

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
КЫРГЫЗСКО-РОССИЙСКИЙ СЛАВЯНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ЕСТЕСТВЕННО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

**Н.А. Рагрин**

**РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ  
ОБОСНОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОТКАЗНОСТИ  
БЫСТРОРЕЖУЩИХ  
СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ**

Бишкек 2017

Рецензенты:

*М.М. Шамсутдинов*, докт. техн. наук, проф.,

*В.А. Самсонов*, канд. техн. наук,

*А.С. Абдыжапаров*, канд. техн. наук

**Рагрин Н.А.**

Р14 РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОТКАЗНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ. Бишкек: Изд-во КРСУ, 2017. 76 с.: табл. 24:, ил. 34:, библи. 51.

В монографии приведены способы обеспечения безотказности быстрорежущих спиральных сверл на основании лабораторных исследований и производственных испытаний.

Для технических вузов и машиностроительных производств.

## ВВЕДЕНИЕ

Около 20 % станков машиностроительной промышленности являются сверлильными, без учета обработки деталей сверлением на станках других типов. Более 60 % деталей машин и механизмов имеют отверстия. Сверление, единственный способ получения отверстий резанием в сплошном материале, поэтому сверла – наиболее часто применяемые режущие инструменты. На промышленных предприятиях спиральные сверла составляют от 11,3 до 22,8 % от общего количества используемого инструмента. В общем объеме производства режущего инструмента наибольший удельный вес занимают спиральные сверла (около 30 %). Поломка сверла приводит к остановке оборудования и, как правило, к браку при обработке изделия. Это особенно характерно для автоматизированного массового производства, в котором одновременно работает большое количество металлорежущих инструментов, когда невозможно проконтролировать текущее состояние каждого из них. Вместе с тем быстрорежущие спиральные сверла широко используются и в других типах производства, где их безотказная эксплуатация не менее важна.

Поэтому разработка и научное обоснование способов обеспечения безотказности быстрорежущих спиральных сверл достаточно актуальная проблема.

**Цель исследований:** разработка и научное обоснование путей и методов обеспечения безотказности быстрорежущих спиральных сверл для различных типов производства.

## **ГЛАВА 1. АНАЛИЗ ПРОБЛЕМЫ. РАЗРАБОТКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Способами повышения безотказности инструментов могут быть конструкторские и технологические решения. Конструкторские решения проблемы представлены в работе [1] в виде различных видов заточки режущей части спиральных сверл. Однако во всех видах производства в большом количестве применяются стандартные сверла, которые затачиваются на специальном оборудовании в основном по цилиндрической или конической заточке задних поверхностей для обеспечения минимальной трудоемкости восстановительных операций. Поэтому именно для стандартных сверл необходимо разрабатывать технологические способы повышения безотказности. В работе [2] показано, что для этих целей в автоматизированном массовом производстве используют скорости резания, на которых стойкость сверл максимальная. Вместе с тем, в качестве технологических способов можно рассматривать и математические зависимости для расчета времени безотказной работы сверл, и критерии отказа, определяющие их безотказную работу.

### **1.1 Анализ существующих экспериментальных способов определения скоростей резания, на которых стойкость сверл максимальная**

Зависимости стойкости и наработки до функционального отказа от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл имеют явно выраженный максимум в диапазоне скоростей резания 12–16 м/мин (рисунок 1.1, кривая 1) [3] и (рисунок 1.2, кривая 1) [4]. Нарботка до функционального отказа выражена суммарной глубиной просверленных отверстий в метрах.

Указанный выше скоростной диапазон повсеместно используется в автоматизированном массовом производстве. Это подтверждается обширными статистическими данными, собранными сотрудниками МГТУ им. Н.Э. Баумана на предприятиях автоматизированного массового производства, которые позволили установить, что при обработке углеродистых конструкционных сталей быстрорежущими сверлами диаметрами от 6 до 45 мм

наиболее часто используется скоростной диапазон от 9 до 16 м/мин [5].

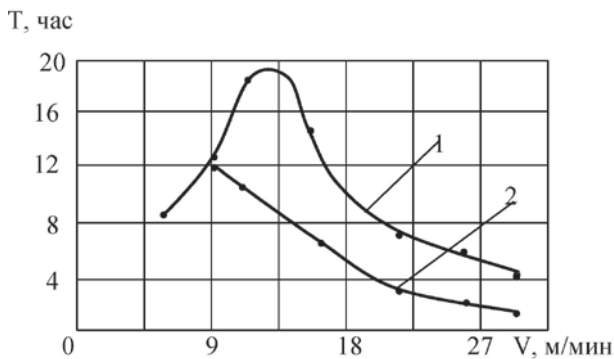


Рисунок 1.1 – Зависимости стойкости от скорости резания

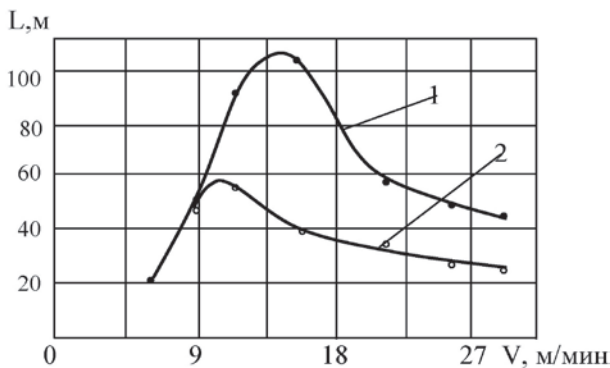


Рисунок 1.2 – Зависимости наработки от скорости резания

Использование сравнительно невысоких скоростей резания обусловлено тем, что в автоматизированном массовом производстве время обработки сверлением не лимитирует производительность оборудования. Поэтому задача обеспечения максимальной стойкости спиральных сверл решается посредством выбора соответствующих параметров режима резания. В этих условиях наиболее рациональным представляется вариант выбора скорости резания, на которой стойкость сверл максимальная.

Определение скоростей резания, на которых стойкость и наработка до функционального отказа спиральных сверл максимальная связана с большой трудоемкостью и материалоемкостью. Как видно на рисунке 1.1, кривая 1, стойкость до функционального отказа достигает 18 часов непрерывной работы сверл, а наработка – более 100 м суммарной глубины просверленных отверстий (рисунок 1.2, кривая 1). Сокращение трудоемкости и материалоемкости с помощью критерия допустимого износа, рекомендуемого методикой [6], представленные на рисунках 1.1, кривая 2, и 1.2, кривая 2 [7], искажает картину характера влияния скорости резания на стойкость и наработку сверл. Скорости резания, максимальная стойкость и наработка сверл на этих кривых не соответствуют фактическим скоростям резания, на которых стойкость и наработка до функционального отказа максимальная (рисунки 1.1 и 1.2, кривые 1). Этим определяется первая задача исследований – разработка и обоснование методов определения скоростей резания, на которых стойкость и наработка сверл максимальные.

## 1.2 Анализ существующих стойкостных моделей

Существующие стойкостные модели получены методом однофакторного эксперимента на интенсивных скоростях резания, больших точках перегиба правой ветви графиков стойкостных зависимостей [8], стойкость в них представлена в детерминированной форме и не учитывает случайный характер процессов изнашивания. Эти стойкостные модели используются для расчета допустимых скоростей резания, максимально возможных при рекомендуемых глубине резания, подаче и заданном периоде стойкости [9]. Справочником технолога-машиностроителя [10] предложена зависимость для расчета допустимых скоростей резания при сверлении:

$$V = \frac{9,8d^{0,4}}{T^{0,2}S^{0,5}}, \quad (1.1)$$

где  $V$  – скорость резания;  $d$  – диаметр сверла;  $S$  – подача на оборот сверла;  $T$  – период стойкости. Рассчитанная по зависи-

мости (1.1) скорость резания для сверл диаметром 11 мм равна 24 м/мин при рекомендуемой подаче 0,25 мм/об, и периоде стойкости 45 мин. В работе [11] приведены результаты анализа 135 операций многоинструментальной обработки отверстий быстрорежущими спиральными сверлами диаметром от 5 до 45 мм в заготовках из углеродистых конструкционных сталей на автоматических линиях, агрегатных станках и станках-автоматах, который показал, что в основном используется диапазон скоростей резания 9–16 м/мин. Рассчитанный по зависимости (1.1) период стойкости для сверл диаметром 11 мм на скорости резания 15 м/мин составил 7,68 ч. Это значение периода стойкости сравнимо со средними стойкостями, представленными в работе [12], по результатам производственных испытаний в условиях автоматизированного массового производства (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Условия и результаты производственных испытаний сверл

Диаметр сверла $d$ , мм	9,8	10,5	11,5	13,8	17,5	21,0	35,0
Скорость резания $V$ , м/мин	13,8	12,6	12,6	12,6	13,8	13,2	11,4
Подача $S$ , мм/об.	0,22	0,14	0,18	0,22	0,2	0,23	0,23
Твердость заготовок НВ	200	300	200	200	190	300	300
Глубина сверления, мм	25,2	28,5	13,0	11,0	24,0	17,0	36,0
Средняя стойкость до отказа, ч	8,1	1,87	8,73	10,24	11,95	2,17	2,81
Дисперсия стойкости $\sigma$ , ч	2,65	0,28	1,38	2,24	1,63	0,65	0,87
Коэффициент вариации	0,33	0,15	0,16	0,22	0,14	0,3	0,3

У сверл диаметром 11,5 мм средняя стойкость равна 8,73 ч, что на 12 % отличается от рассчитанного по зависимости (1.1) периода стойкости. Период стойкости, близкий к средней стойкости сверл, работавших в аналогичных производственных условиях, указывает на то, что до его окончания половина сверл выйдет из строя, т. е. зависимость (1.1) не учитывает случайный характер процессов изнашивания сверл, приводящий к значительному рассеиванию их стойкости. Вместе с тем, зависимость

(1.1) не учитывает твердость обрабатываемого материала, которая существенно влияет на среднюю стойкость.

Это определило вторую задачу исследований – разработку математической модели для расчета стойкости и наработки спиральных сверл с необходимой вероятностью безотказной работы с учетом условий их эксплуатации и случайного характера процессов изнашивания.

### 1.3 Анализ критериев отказа и признаков потери работоспособности спиральных сверл

ГОСТ 2575–83 в пояснении к термину «критерий отказа режущего инструмента» определяет критерий затупления режущего инструмента, как частный случай критерия отказа, характеризующегося значением износа инструмента преимущественно по задней поверхности лезвия. Предельно допустимая величина износа задней поверхности является общепринятым критерием износа режущего инструмента [9]. Методикой [6] регламентируются критерии износа спиральных сверл в виде определенной ширины фаски износа задней поверхности в зависимости от диаметра сверла, без учета случайного характера процессов изнашивания.

Известны зависимости износа задней поверхности от времени работы  $\tau$ , скорости резания  $V$  и подачи  $S$  для различных видов режущих инструментов [13]. Для быстрорежущих спиральных сверл эта зависимость имеет вид:

$$\Delta = C_{\Delta} \tau^{1,42} v^{4,85} s^{2,35},$$

где  $\Delta$  – износ задней поверхности;  $C_{\Delta}$  – постоянный коэффициент.

Очевидно, что эта зависимость не может быть использована в качестве критериальной зависимости, т. к. по ней невозможно рассчитать предельно-допустимую величину износа сверл. Другие зависимости для расчета величины износа спиральных сверл не определены. Вместе с тем в работах [3, 14] показано, что износ задних поверхностей быстрорежущих спиральных сверл может служить критерием отказа только на высоких скоростях резания (21–30 м/мин). При работе на средних и низких скоро-



стях резания (6–16 м/мин), имеют место другие критерии отказа, не связанные с износом задних поверхностей.

В результате лабораторных исследований и производственных испытаний были выявлены признаки потери работоспособности сверл в условиях автоматизированного производства, представленные в работе [14], появление которых предупреждает, что сверла практически потеряли работоспособность, и дальнейшая их эксплуатация в любой момент может привести к поломке инструмента. В работе [14] эти признаки определены как признаки предельного состояния сверл. Такими признаками являются:

- ✓ возникновение значительных вибраций системы СПИД при большом количестве одновременно работающих сверл одного диаметра, например при обработке крепежных отверстий во фланцах;
- ✓ звуковые явления «щелчки», следы прилипания обрабатываемого металла к изношенным участкам ленточек;
- ✓ выдавливание металла и появление кольцевого валика на входе в отверстие;
- ✓ появление рваных заусенцев на выходной стороне отверстия.

Причиной первых трех из перечисленных выше признаков является износ ленточек сверл, а именно – вибрации системы СПИД при большом количестве одновременно работающих сверл – появляются в результате пикообразных всплесков момента резания во время «щелчка» при защемлении изношенного участка рабочей части инструмента [14]. Выдавливание кольцевого валика на входе в отверстие происходит в результате большой обратной конусности на изношенных участках ленточек.

Появление рваных заусенцев на выходной стороне отверстия происходит по причине затупления и потери режущих свойств уголков сверл, в результате чего определенная толщина обрабатываемого металла не срезается, а выдавливается при выходе сверла из отверстия. Этому способствует и размягчение обрабатываемого металла в результате возрастания температуры резания из-за большой величины износа сверл [3].

Однако в автоматизированном массовом производстве, когда контроль со стороны рабочего за состоянием каждого ин-

струмента практически невозможен, использование указанных признаков чревато поломкой инструментов, так как имеет место большое рассеивание их стойкости [12].

Это определило третью задачу исследований – разработку критериев отказа быстрорежущих спиральных сверл и критериальных зависимостей для расчета критериев отказа, учитывающих случайный характер процессов изнашивания.

На основании приведенного выше анализа с учетом цели исследований определены **задачи исследований**:

1. Разработка и обоснование способов определения скоростей резания, на которых стойкость и наработка сверл максимальные.

2. Разработка стойкостной модели для расчета стойкости спиральных сверл с необходимой вероятностью безотказной работы с учетом условий их эксплуатации и случайного характера процессов изнашивания.

3. Разработка критериев отказа быстрорежущих спиральных сверл и критериальных зависимостей, учитывающих случайный характер процессов изнашивания и условия эксплуатации спиральных сверл.

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В задачи исследования входили испытания быстрорежущих спиральных сверл в лабораторных и производственных условиях. В лабораторных условиях [3] испытания проводили со спиральными сверлами диаметром  $d = 10,2$  мм по ГОСТ 10903–77, изготовленными из быстрорежущей стали Р6М5. Сверлились сквозные отверстия глубиной  $3d$  в стали 45190 НВ на скоростях резания  $V = 6; 9; 12; 16; 21; 26; 30$  м/мин и подаче  $S = 0,23$  мм/об. Испытания сверл проводили до функционального отказа – полной потери режущих свойств в результате износа рабочих элементов, участвующих в формообразовании отверстия. В процессе испытаний периодически контролировалась величина износа и физическое состояние каждого из них. Варьировалась скорость резания, а все остальные параметры были строго фиксированными и идентичными. Сверла специально изготавливали из одной плавки быстрорежущей стали по одной технологии, отбирали по идентичности геометрических параметров и затачивали по двухплоскостной заточке с доводкой алмазным инструментом. Обрабатывали заготовки из одной плавки стального горячекатаного проката. Обработка отверстий велась на высокоточном станке с ЧПУ мод. 2Р135Ф2. При установке сверл в шпиндель станка контролировали осевые и радиальные биения режущих кромок, которые практически были равны нулю. Таким образом, было максимально исключено влияние случайных факторов процесса обработки.

Измерение осевой силы и момента резания производили посредством электродинамометров УДМ-100 и УДМ-600 со стандартной усилительной и измерительной аппаратурой. Испытывались сверла с различной величиной износа конструктивных элементов [15].

Исследования влияния скорости резания на наличие и высоту нароста и на характер процесса наростообразования проводили на экспериментальном стенде, оснащённом оптико-механическим устройством [16].

Были построены зависимости от скорости резания: осевой силы и момента резания сверл с наличием износа конструктивных элементов, величины нароста на уголках сверла.

В отличие от других видов металлорежущего инструмента при обработке сверлами одного диаметра, варьировать можно только двумя параметрами режима резания – скоростью резания и подачей. Для определения характера влияния подачи на стойкость сверл в диапазоне скоростей резания, соответствующих максимуму стойкостной зависимости, были проведены лабораторные исследования со сверлами диаметром  $d = 14,5$  мм по ГОСТ 10903–77, изготовленными из быстрорежущей стали Р6М5. Сверлились сквозные отверстия глубиной  $3d$  в стали 45 190НВ при скоростях резания  $V = 12$  и  $16$  м/мин и подачах  $S = 0,18, 0,3$  и  $0,4$  мм/об. Определяли наработку до достижения износа задних поверхностей величины, равной нормативному критерию износа сверл данного диаметра  $h_{3н} = 0,5$  мм [17]. В процессе исследований через каждые 50–100 отверстий контролировали износ задних поверхностей ( $h_3$ ) и ленточек ( $K_{л}$ ) сверл.

В производственных условиях [7] испытывались партии спиральных сверл по ГОСТ 10903–77 из стали Р6М5 различных диаметров, по 25 шт. каждого диаметра, при обработке заготовок из углеродистых конструкционных сталей на автоматических линиях, агрегатных станках и станках-автоматах. Сверла эксплуатировались до появления признаков потери работоспособности, за которыми следует функциональный отказ [14]. Результаты испытаний обрабатывались методами аппроксимации, математической статистики и теории корреляции.

### ГЛАВА 3. СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ РЕЗАНИЯ, НА КОТОРЫХ СТОЙКОСТЬ И НАРАБОТКА СВЕРЛ МАКСИМАЛЬНЫЕ. РЕШЕНИЕ ПЕРВОЙ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как было показано выше, определение скоростей резания экспериментальным путем, на которых стойкость и наработка до функционального отказа максимальная, связано с большой трудоемкостью и материалоемкостью. На рисунках 1.1 и 1.2 (кривые 1), видно, что стойкость сверл до функционального отказа в области максимума стойкостной зависимости достигает 18 час, а наработка – 102 м. Использование общепринятой методики стойкостных испытаний с применением критерия равного износа [6], значительно искажает картину влияния скорости резания на стойкость в диапазоне скоростей резания максимума стойкостной зависимости (рисунки 1.1 и 1.2, кривые 2).

Известен аналитический метод определения скорости резания максимума стойкостной зависимости [8], заключающийся в том, что предварительно проводится аппроксимация графика зависимости  $T = f(V)$  посредством уравнения вида

$$T = C_T V^b e^{-cV}.$$

Числовое значение скорости резания максимума  $V_m$  определяются по формуле

$$V_m = -b/c. \quad (3.1)$$

Однако для применения аналитического метода необходимо построить стойкостную зависимость посредством проведения стойкостных испытаний.

Поэтому задача определения скорости резания максимума стойкости быстрорежущих спиральных сверл без проведения стойкостных испытаний, является достаточно актуальной.

#### 3.1 Числовые значения скоростей резания максимумов стойкости и наработки

В работе [18] показано, что в автоматизированном массовом производстве при обработке заготовок на автоматических линиях с использованием большого количества разнообразных ин-

струментов, в том числе спиральных сверл различных диаметров, останавливать линию для замены каждого инструмента по истечении нормативного периода стойкости экономически нецелесообразно. В этих условиях удобно и целесообразно производить замену инструмента во время пересмен. Увеличение стойкости сверл посредством снижения скорости резания позволяет устанавливать период стойкости равным или кратным суммарному времени сверления отверстий в заготовках, изготавливаемых за одну смену. Это время рассчитывается исходя из суммарной глубины конкретных отверстий, просверленных за одну смену. Поэтому представляется более целесообразным период эксплуатации сверл между заточками оценивать не стойкостью, а наработкой, выраженной в суммарной глубине просверленных отверстий.

В случаях обработки относительно небольших партий деталей, когда суммарная глубина просверленных отверстий одной партии значительно меньше наработки до функционального отказа инструментов (мелкосерийное или серийное производство) более целесообразно оценивать работоспособность сверл в единицах времени, то есть оперировать понятием стойкости. Однако как видно на рисунках 1.1 и 1.2, максимумы зависимостей стойкости и наработки от скорости резания не совпадают. Скорость резания максимума наработки сверл смещена вправо по оси абсцисс [19].

Посредством аппроксимации области максимума стойкостью зависимости, представленной на рисунке 1.1, кривая 1, получено математическое выражение

$$T = 1,42 \times 10^{-4} V^{7,6} e^{-0,595V} . \quad (3.2)$$

В таблице 3.1 приведены фактические и рассчитанные по формуле (3.2) стойкости и погрешности расчетов. Средняя погрешность расчетов составила 2,25 %. Фактические и рассчитанные стойкости отличаются незначительно.

Посредством аппроксимации области максимума зависимости, представленной на рисунке 1.2, кривая 1, получено следующее выражение:

$$L = 2,556 \times 10^{-4} V^{7,66} e^{-0,52V} . \quad (3.3)$$

Таблица 3.1 – Фактические, и рассчитанные по формуле (3.2) стойкости

$V$ , м/мин	$T_{\text{факт}}$ , ч	$T_{\text{расч}}$ , ч	Погрешность, %
9	12,4	11,99	3,3
12	18,4	17,91	2,66
16	14,6	14,76	1,09

В таблице 3.2 приведены фактические, и рассчитанные по формуле (3.3) наработки до отказа и погрешности расчетов. Средняя погрешность расчетов составила 1,46 %. Фактические и рассчитанные наработки отличаются незначительно.

Таблица 3.2 – Фактические, и рассчитанные по формуле (3.3) наработки до отказа

$V$ , м/мин	$L_{\text{факт}}$ , м	$L_{\text{расч}}$ , м	Погрешность, %
9	49	48,4	1,22
12	93	92,06	1,01
16	102	104,18	2,14

Рассчитанная по формуле (3.1) скорость резания максимума стойкости (рисунок 1.1, кривая 1) составляет  $V_{\text{ТМ}} = 12,8$  м/мин, тогда как рассчитанная по этой же формуле скорость резания максимума наработки (рисунок 1.2, кривая 1), составляет  $V_{\text{ЛМ}} = 14,7$  м/мин. Поэтому поставленная задача усложняется необходимостью определения двух значений скоростей резания: максимальной стойкости и максимальной наработки. Максимумы стойкости и наработки при определенных скоростях резания ( $V_{\text{ТМ}}$ ) и ( $V_{\text{ЛМ}}$ ), рассчитанные по зависимостям (3.2) и (3.3) соответственно равны  $T_{\text{м факт}} = 18,2$  ч,  $L_{\text{м факт}} = 107,02$  м.

### 3.2 Способы определения скоростей резания максимальной стойкости на основе закономерностей влияния скорости резания на физические характеристики процесса сверления

#### 3.2.1 Закономерности влияния скорости резания на силы и моменты резания при сверлении сверлами с наличием износа

Известно, что скорость резания не оказывает влияния на силы и моменты резания при сверлении острыми сверлами, зависимости сил и моментов резания от скорости резания линейны и параллельны оси абсцисс. По мере увеличения износа сверл характер зависимостей меняется. На графиках зависимостей осевой силы и момента резания появляются области минимумов в диапазоне скоростей 12–16 м/мин (рисунки 3.1, 3.2) [3, 15].

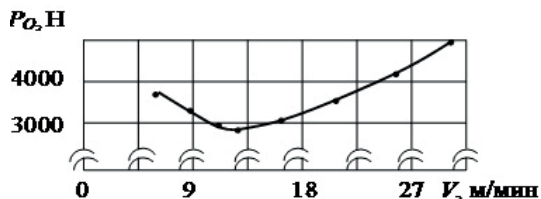


Рисунок 3.1 – Зависимость осевой силы от скорости резания при сверлении сверлами с наличием износа

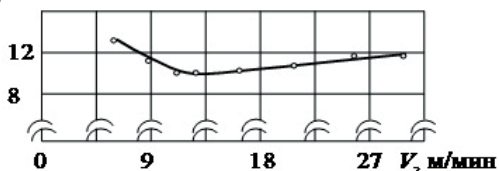


Рисунок 3.2 – Зависимость момента резания от скорости резания при сверлении сверлами с наличием износа

Скорости резания минимумов на графиках зависимостей осевой силы и момента резания при сверлении сверлами с наличием износа конструктивных элементов (рисунки 3.1, 3.2) близки скоростям резания максимумов зависимостей стойкости



и наработки (рисунки 1.1 и 1.2, кривые 1). На способ определения оптимальной скорости резания получено авторское свидетельство [20].

Посредством аппроксимации области минимума зависимости, представленной на рисунке 3.1, получено следующее математическое выражение

$$P_o = 5370V^{-1,786}e^{0,129V}. \quad (3.4)$$

В таблице 3.3 приведены фактические и рассчитанные по формуле (3.4) осевые силы и погрешности расчетов.

Таблица 3.3 – Фактические, и рассчитанные по формуле (3.4) осевые силы

$V$ , м/мин	$P_o$ факт, Н	$P_o$ расч, Н	Погрешность, %
9	336	338,77	0,82
12	300	298,43	0,52
16	300	299,088	0,3

Средняя погрешность расчетов составила 0,54 %.

Посредством аппроксимации области минимума зависимости, представленной на рисунке 3.2, получено следующее выражение:

$$M = 168V^{-1,733}e^{0,13V}. \quad (3.5)$$

В таблице 3.4 приведены фактические, и рассчитанные по формуле (3.5) моменты резания и погрешности расчетов.

Таблица 3.4 – Фактические и рассчитанные по формуле (3.5) моменты резания и погрешности расчетов

$V$ , м/мин	$M$ факт, Н·м	$M$ расч, Н·м	Погрешность, %
9	12	12,015	0,125
12	10,8	10,78	0,185
16	11	11,013	0,118

Средняя погрешность расчетов составила 0,14 %.

Рассчитанная по формуле (3.1) скорость резания минимума осевой силы (рисунок 3.1) составляет  $V_{\text{ром}} = 13,84$  м/мин. Рассчитанная по формуле (3.1) скорость резания минимума момен-

та резания (рисунок 3.2) составляет  $V_{MM} = 13,33$  м/мин. Сравнение значений скоростей резания минимумов осевой силы и момента резания со значениями скоростей резания максимумов стойкости и наработки показало, что скорость резания минимума осевой силы ( $V_{POM}$ ) на 8,1 % отличается от скорости резания максимума стойкости ( $V_{TM}$ ) и на 6,2 % – от скорости резания максимума наработки ( $V_{LM}$ ), то есть более близка к последней. Скорость резания минимума момента резания ( $V_{MM}$ ) на 4,1 % отличается от скорости резания максимума стойкости ( $V_{TM}$ ) и на 10,27 % – от скорости резания максимума наработки ( $V_{LM}$ ), то есть достаточно близка к первой.

Результаты сравнительного анализа стойкостей и наработок на скоростях резания минимумов осевой силы и момента резания с максимальной фактической стойкостью и наработкой представлены в таблицах 3.5 и 3.6.

Таблица 3.5 – Фактические и рассчитанные максимумы стойкости и погрешности расчетов

$V_{TM} = 12,8$ м/мин	$V_{POM} = 13,84$ м/мин	$V_{MM} = 13,33$ м/мин
$T_{M\text{ факт}} = 18,2$ ч	$T_{VPOM\text{ расч}} = 17,73$ ч	$T_{VMM\text{ расч}} = 18,05$ ч
Погрешность, %	4,7	0,83

Анализ данных таблицы 3.5 показывает, что расчетная максимальная стойкость на скорости резания минимума момента резания практически совпадает с максимальной фактической стойкостью, погрешность расчетов составляет 0,83 %.

Таблица 3.6 – Фактические, и рассчитанные максимумы наработки и погрешности расчетов

$V_{LM} = 14,7$ м/мин	$V_{POM} = 13,84$ м/мин	$V_{MM} = 13,33$ м/мин
$L_{M\text{ факт}} = 107,02$ м	$L_{VPOM\text{ расч}} = 105,4$ м	$L_{VMM\text{ расч}} = 103,13$ м
Погрешность, %	1,44	3,63

В таблице 3.6 показано, что расчетная максимальная наработка на скорости резания минимума осевой силы практически совпадает с максимальной фактической наработкой, погрешность расчетов составляет 1,44 %.

### 3.2.2 Закономерности влияния скорости резания на процессы наростообразования при сверлении спиральными сверлами

Автор работы [9] указывает на положительную функцию нароста, который являясь режущим клином, защищает контактные поверхности лезвий инструментов и главные режущие кромки от разрушения, тем самым увеличивает их стойкость. Максимальная стойкость главных режущих кромок быстрорежущих спиральных сверл наблюдается при максимальной величине нароста [16]. Известно, что нарост достигает своей максимальной величины при таком значении скорости резания, при котором температура резания близка 300 °С. Это диапазон скоростей резания 15–30 м/мин [9]. Поэтому в зависимости от условий обработки нарост достигает максимальной величины при различных скоростях резания. В работе [21] проведен анализ условий работы режущих лезвий и уголков спиральных сверл и показано, что при сверлении температура резания выше, чем при других методах обработки при аналогичных значениях скоростей резания. Результаты исследований, представленные в работе [16], подтвердили это положение (рисунок 3.3).

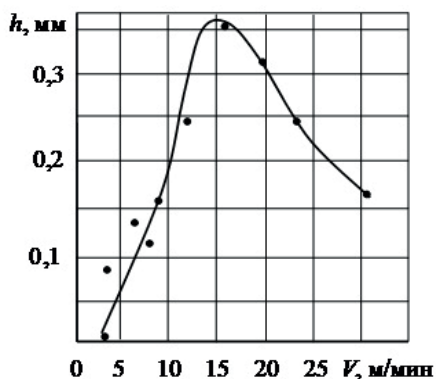


Рисунок 3.3 – Зависимость высоты нароста на уголках сверла от скорости резания

На рисунке 3.3 видно, что максимальной величины нарост достигает на скоростях резания, близких к 15 м/мин, что являет-

ся нижней границей указанного выше диапазона скоростей резания активного наростообразования (15–30 м/мин).

Посредством аппроксимации области максимума зависимости, представленной на рисунке 3.3, получено следующее выражение:

$$h = 1,57 \times 10^{-7} V^{8,335} e^{-0,529V}. \quad (3.6)$$

В таблице 3.7 приведены фактические и рассчитанные по формуле (3.6) величины нароста и погрешности расчетов. Средняя погрешность расчетов составила 0,2 %.

Таблица 3.7 – Фактические и рассчитанные по формуле (3.6) величины нароста и погрешности расчетов

$V$ , м/мин	$h_{\text{факт}}$ , мм	$h_{\text{расч}}$ , мм	Погрешность, %
9,8	0,16	0,1608	0,5
15,2	0,36	0,36	0
18,7	0,32	0,3266	0,11

Рассчитанная по формуле (3.1) скорость резания максимума высоты нароста (рисунок 3.3) составляет  $V_{\text{hm}} = 15,75$  м/мин. Сравнение данной скорости резания со значениями скоростей резания максимумов стойкости и наработки показало, что скорость резания максимума высоты нароста на 23,04 % отличается от скорости резания максимума стойкости, и на 6,6 % – от скорости резания максимума наработки, то есть более близка к последней. Сравнительный анализ показал, что на скорости резания максимума высоты нароста расчетная максимальная наработка до отказа составляет  $L_{\text{vhмрасч}} = 105,16$  м, что незначительно меньше (на 1,74 %) фактической максимальной наработки до отказа  $L_{\text{м факт}} = 107,02$  м.

### **3.2.3 Закономерности влияния скорости резания на физические характеристики процессов изнашивания спиральных сверл**

Одной из физических характеристик процессов изнашивания спиральных сверл является интенсивность изнашивания их конструктивных элементов. В работах [3, 22] представлены ре-

зультаты экспериментальных исследований влияния скорости резания на интенсивность изнашивания ленточек спиральных сверл ( $I_{Kл}$ ). Показано, что зависимость интенсивности изнашивания ленточек от скорости резания имеет явно выраженный экстремальный характер с минимумом в области скорости резания 15 м/мин. В работе [23] приведена зависимость интенсивности изнашивания уголков спиральных сверл ( $I_{\Delta d}$ ) от скорости резания, которая имеет аналогичный характер и показано, что скорости резания минимумов данных зависимостей совпадают.

Интенсивность изнашивания может быть выражена отношением величины износа ко времени работы ( $[I_{Kл ч}]$ ,  $[I_{\Delta d ч}] = \text{мм/ч}$ ), (рисунки 3.4, 3.6), либо – к суммарной глубине просверленных отверстий – наработке ( $[I_{Kл м}]$ ,

$[I_{\Delta d м}] = \text{мм/м}$ ), (рисунки 3.5, 3.7).

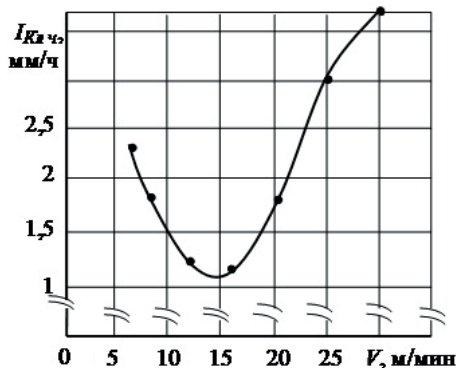


Рисунок 3.4 – Зависимость интенсивности изнашивания ленточек от скорости резания

Выше представлены методы аппроксимации экстремальной зависимости математическим выражением (3.1) и числовое значение скорости резания максимума  $V_m$  определяются по формуле (3.2). Посредством аппроксимации области минимума зависимости, представленной на рисунке 3.4, получено следующее математическое выражение:

$$I_{Kл ч} = 5128V^{-0.5,13} e^{0,368V} . \quad (3.7)$$

В таблице 3.8 приведены фактические и рассчитанные по формуле (3.7) интенсивности изнашивания ленточек сверл и погрешности расчетов.

Таблица 3.8 – Фактические и рассчитанные по формуле (3.7) интенсивности изнашивания ленточек сверл и погрешности расчетов

$V$ , м/мин	$I_{Кл\ ч}$ факт., мм/ч	$I_{Кл\ ч}$ расч., мм/ч	Погрешность, %
9	1,77	1,79	1,13
12	1,25	1,235	1,2
16	1,23	1,23	0

Средняя погрешность расчетов составила 0,77 %.

Посредством аппроксимации области минимума зависимости, представленной на рисунке 3.5, получено следующее математическое выражение:

$$I_{Кл\ м} = 1409209V^{-8,96} e^{0,56V}. \quad (3.8)$$

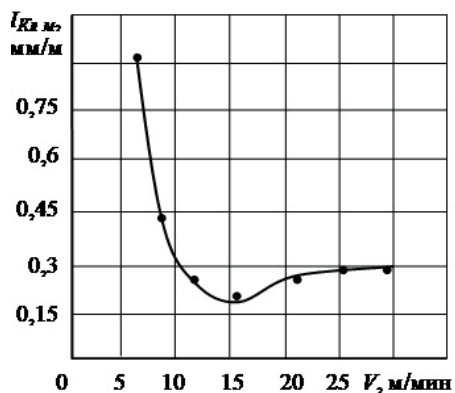


Рисунок 3.5 – Зависимость интенсивности изнашивания ленточек от скорости резания

В таблице 3.9 приведены фактические, и рассчитанные по формуле (3.8) интенсивности изнашивания ленточек сверл и погрешности расчетов.

Таблица 3.9 – Фактические, и рассчитанные по формуле (3.8) интенсивности изнашивания ленточек сверл, и погрешности расчетов

$V$ , м/мин	$I_{Кл.м}$ факт, мм/м	$I_{Кл.м}$ расч, мм/м	Погрешность, %
12	0,25	0,25	0
16	0,176	0,178	1,13
21	0,26	0,257	1,15

Средняя погрешность расчетов составила 0,76 %.

Рассчитанная по формуле (3.1) скорость резания минимума интенсивности изнашивания ленточек (рисунок 3.4) составляет  $V_{Икл.чм} = 13,94$  м/мин, а на рисунке 3.5 –  $V_{Икл.мм} = 16,0$  м/мин.

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены скорости резания максимумов стойкости ( $V_{Тм} = 12,8$  м/мин) и наработки ( $V_{Лм} = 14,7$  м/мин), и фактические максимумы стойкости и наработки на этих скоростях резания и  $T_{м факт} = 18,2$  ч,  $L_{м факт} = 107,02$  м соответственно.

Сравнение значений данных скоростей резания со значениями скоростей резания максимумов стойкости и наработки показало, что скорость резания  $V_{Икл.чм} = 13,94$  м/мин на 8,9 % отличается от скорости резания максимума стойкости ( $V_{Тм}$ ) и на 5,45 % отличается от скорости резания максимума наработки ( $V_{Лм}$ ), то есть более близка к последней. Скорость резания  $V_{Икл.мм} = 16,0$  м/мин на 25 % отличается от скорости резания максимума стойкости, и на 8,12 % – от скорости резания максимума наработки, то есть также более близка к последней. Результаты сравнительного анализа расчетных максимальных стойкостей с максимальной фактической стойкостью на скоростях резания минимумов интенсивностей изнашивания ленточек, представлены таблице 3.10. По данным таблицы 3.10 видно, что при скорости резания  $V_{Икл.чм} = 13,94$  м/мин максимальная расчетная стойкость достаточно близка к максимальной фактической стойкости, погрешность расчетов составляет 3,07 %.

Результаты сравнительного анализа максимальных расчетных наработок с максимальной фактической наработкой при скоростях резания минимумов интенсивностей изнашивания ленточек, представлены таблице 3.11.

Таблица 3.10 – Фактические, и рассчитанные максимумы стойкости, и погрешности расчетов

$V_{ТМ} = 12,8$ м/мин	$V_{Икл чм} = 13,94$ м/мин	$V_{Икл мм} = 16,0$ м/мин
$T_{м факт} = 18,2$ ч	$T_{VIKл чм расч} = 17,64$ ч	$T_{VIKл мм расч} = 14,76$ ч
Погрешность, %	3,07	18,9

Таблица 3.11 – Фактические, и рассчитанные максимумы наработки, и погрешности расчетов

$V_{ЛМ} = 14,7$ м/мин	$V_{Икл чм} = 13,94$ м/мин	$V_{Икл мм} = 16,0$ м/мин
$L_{м факт} = 107,02$ м	$L_{VIKл чм расч} = 105,8$ м	$L_{VIKл мм расч} = 104,18$ м
Погрешность, %	1,14	2,65

Данные таблицы 3.11 показывают, что обе расчетные максимальные наработки достаточно близки максимальной фактической наработке до отказа.

На рисунках 3.6 и 3.7 представлены зависимости интенсивности изнашивания уголков сверл.

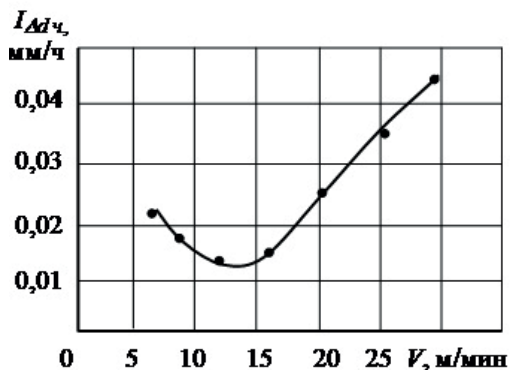


Рисунок 3.6 – Зависимость интенсивности изнашивания уголков сверл



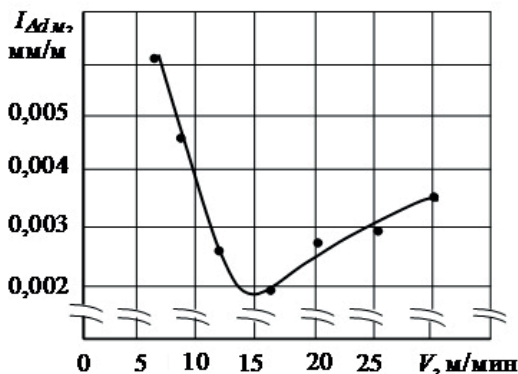


Рисунок 3.7 – Зависимость интенсивности изнашивания уголков сверл

Посредством аппроксимации области минимума зависимости, представленной на рисунке 3.6, получено следующее математическое выражение:

$$I_{\Delta d_m} = 52,53V^{-5,244} e^{0,393V} . \quad (3.9)$$

В таблице 3.12 приведены фактические и рассчитанные по формуле (3.9) интенсивности изнашивания уголков сверл и погрешности расчетов.

Таблица 3.12 – Фактические и рассчитанные по формуле (3.9) интенсивности изнашивания уголков сверл и погрешности расчетов

$V, \text{ м/мин}$	$I_{\Delta d_m}$ факт., мм/ч	$I_{\Delta d_m}$ расч., мм/ч	Погрешность, %
9	0,0177	0,1788	1,02
12	0,013	0,01286	1,08
16	0,0137	0,013704	0,03

Средняя погрешность расчетов составила 0,71 %.

Посредством аппроксимации области минимума зависимости, представленной на рисунке 3.7, получено следующее математическое выражение:

$$I_{\Delta d_m} = 53,8V^{-5,668} e^{0,3445V} . \quad (3.10)$$

В таблице 3.13 приведены фактические, и рассчитанные по формуле (3.10) интенсивности изнашивания уголков сверл

и погрешности расчетов. Средняя погрешность расчетов составила 0,98 %.

Таблица 3.13 – Фактические, и рассчитанные по формуле (3.10) интенсивности изнашивания уголков сверл, и погрешности расчетов

$V$ , м/мин	$I_{Ddм}$ факт, мм/ч	$I_{Ddм}$ расч, мм/ч	Погрешность, %
9	0,0046	0,00466	1,3
12	0,0026	0,00257	1,15
16	0,002	0,013704	0,5

Рассчитанная по формуле (3.1) скорость резания минимума интенсивности изнашивания уголков (рисунок 3.6) составляет  $V_{IAd чм} = 13,35$  м/мин, а на рисунке 3.7 –  $V_{IAd мм} = 16,44$  м/мин. Сравнение значений данных скоростей резания со значениями скоростей резания максимумов стойкости и наработки показало, что скорость резания  $V_{IAd чм} = 13,35$  м/мин на 4,3 % отличается от скорости резания максимума стойкости ( $V_{Тм}$ ) и на 9,18 % отличается от скорости резания максимума наработки ( $V_{Lм}$ ), то есть более близка к первой. Скорость резания  $V_{IAd мм} = 16,44$  м/мин на 28,44 % отличается от скорости резания максимума стойкости ( $V_{Тм}$ ) на 10,58 % отличается от скорости резания максимума наработки ( $V_{Lм}$ ), то есть более близка к последней.

Результаты сравнительного анализа расчетных максимальных стойкостей с фактической максимальной стойкостью на скоростях резания минимумов интенсивностей изнашивания уголков, представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Фактические, и рассчитанные максимумы стойкости, и погрешности расчетов

$V_{Тм} = 12,8$ м/мин	$V_{IAd чм} = 13,35$ м/мин	$V_{IAd мм} = 16,44$ м/мин
$T_{м факт} = 18,2$ ч	$T_{VIAd чм расч} = 18,04$ ч	$T_{VIAd мм расч} = 13,96$ ч
Погрешность, %	0,88	23,3

Данные таблицы 3.14 показывают, что на скорости резания  $V_{IAd чм} = 13,35$  м/мин максимальная расчетная стойкость доста-

точно близка максимальной фактической стойкости, погрешность расчетов составляет 0,88 %.

Результаты сравнительного анализа расчетных максимальных наработок с фактической максимальной наработкой на скоростях резания минимумов интенсивностей изнашивания уголков, представлены таблице 3.15.

Таблица 3.15 – Фактические, и рассчитанные максимумы наработки, и погрешности расчетов

$V_{LM} = 14,7$ м/мин	$V_{I\Delta d_{чм}} = 13,35$ м/мин	$V_{I\Delta d_{мм}} = 16,44$ м/мин
$L_{м\ факт} = 107,02$ м	$L_{VI\Delta d_{чм\ расч}} = 103,25$ м	$L_{VI\Delta d_{мм\ расч}} = 102,02$ м
Погрешность, %	3,52	4,84

Данные таблицы 3.15 показывают, что максимальные расчетные наработки на обеих скоростях резания достаточно близки максимальной фактической наработке до отказа.

### 3.3 Классификация способов определения скоростей резания, на которых стойкость и наработка спиральных сверл максимальная

Анализ способов определения скоростей резания при максимумах стойкости и наработки, представленных выше, позволил составить их классификацию (рисунок 3.8).

В классификации (рисунок 3.8)  $V_{ром}$  и  $V_{мм}$  – минимумы зависимостей от скорости резания осевой силы и момента резания при работе сверлами с наличием износа;  $V_{hm}$  – максимум зависимости от скорости резания высоты нароста на уголках сверл;  $V_{IKл\ чм}$  и  $V_{I\Delta d\ чм}$  – минимумы зависимостей от скорости резания интенсивностей изнашивания ленточек и уголков;  $T_{V_{мм}}$  – стойкость на скорости резания минимума зависимости момента резания от скорости резания;  $T_{VI\Delta d\ чм}$  – стойкость на скорости резания минимума зависимости интенсивности износа уголков от скорости резания;  $L_{VIKл\ чм}$  – наработка на скорости резания минимума зависимости интенсивности износа ленточек от скорости резания;  $L_{V_{ром}}$  – наработка на скорости резания минимума зависимости осевой силы от скорости резания;  $L_{V_{hm}}$  – наработка

на скорости резания максимума зависимости высоты нароста от скорости резания. В процентах показана сравнительная с фактическими значениями погрешность расчетов.

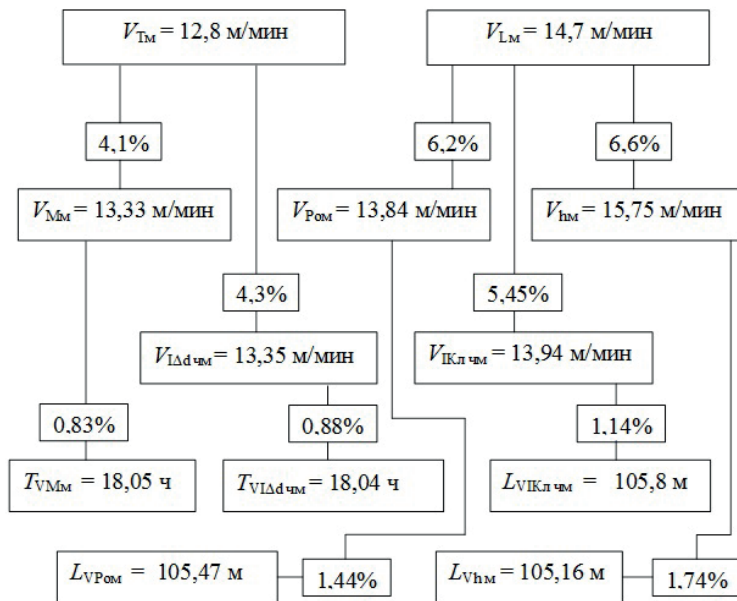


Рисунок 3.8 – Классификация способов определения скоростей резания при максимумах стойкости и наработки спиральных сверл

В работах [24, 25, 26] показано, что кривые износа ленточек и уголков сверл близки к линейным, и с достаточной точностью могут быть аппроксимированы уравнениями прямой линии. Интенсивности изнашивания этих конструктивных элементов постоянны во времени и наработке и равны тангенсам углов наклона кривых износа к осям абсцисс. Поэтому их определение не связано с большой трудоемкостью и материалоемкостью.

Таким образом, результаты исследований позволили сделать следующие выводы.

1. Скорости резания, на которых стойкость и наработка максимальные, могут быть определены тремя способами без проведения стойкостных испытаний:

- аппроксимацией областей минимумов зависимостей сил и моментов резания от скорости резания при работе сверлами с наличием износа;

- аппроксимацией областей минимумов зависимостей интенсивности изнашивания ленточек и уголков от скорости резания;

- аппроксимацией области максимума зависимости высоты нароста на уголках от скорости резания.

2. Разработана классификация способов определения скоростей резания, на которых стойкость и наработка спиральных сверл максимальная.

## **ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА СТОЙКОСТНОЙ МОДЕЛИ. РЕШЕНИЕ ВТОРОЙ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

В главе 3 рассмотрена актуальная проблема разработки способов определения скоростей резания, на которых стойкость и наработка спиральных сверл максимальные, без проведения трудоемких и материалоемких стойкостных испытаний. Эти скорости резания повсеместно используются в автоматизированном массовом производстве т.к. максимальная стойкость повышает безотказность сверл. Однако быстрорежущие спиральные сверла широко используются и в других типах производства, где их безотказная эксплуатация не менее важна. Поэтому математическая модель, помимо случайного характера процессов изнашивания, должна опираться на параметры режима резания, обеспечивающие максимальную стойкость для всех типов производства. При сверлении для определенного диаметра сверла варьированию подлежат только два параметра режима резания – это скорость резания и подача.

### **4.1 Выбор скоростей резания максимальной стойкости для различных типов производства**

В работе [2] проведен анализ скоростей резания, применяемых различными типами производства. Скорости резания максимума стойкостной зависимости используют в автоматизированном массовом производстве. В крупносерийном, серийном и единичном производствах используют диапазон скоростей резания от 16 до 30 м/мин правой ветви графика стойкостной зависимости (рисунок 1.1), при этом скоростной диапазон от 16 до 21 м/мин преимущественно используется в крупносерийном и серийном производствах, а в мелкосерийном и единичном – от 21 до 30 м/мин. Переход от массового к серийному и единичному производствам характеризуется увеличением производительности оборудования в основном за счет увеличения скорости резания.

Очевидно, что для каждого типа производства необходимо выбирать минимальную скорость резания, позволяющую обеспечить необходимую производительность оборудования и максимальную стойкость (наработку) спиральных сверл.

В работе [27] предложен способ выбора минимальной скорости резания, обеспечивающей программу выпуска конкретных изделий, и разработана зависимость для ее расчета.

При проектировании автоматической линии, агрегатного станка, станка-автомата, и разработке управляющей программы для станка с ЧПУ задается годовая программа выпуска изделий  $N$ . Исходя из этого, рассчитывается количество изделий изготавливаемых за одну смену:

$$N_{см} = N / Ч_{см},$$

где  $Ч_{см}$  – число рабочих смен в году.

Число рабочих смен в году находится по формуле

$$Ч_{см} = C \times \Phi,$$

где  $C$  – число смен в сутки;  $\Phi$  – число рабочих дней в году

$$\Phi = 365 - (B + П),$$

где 365 – число дней в году;  $B$  – число выходных дней;  $П$  – число праздничных дней.

При наличии количества изделий, изготавливаемых за одну смену, рассчитывается суммарная глубина отверстий одного диаметра, просверленных за одну смену

$$L_{см} = l_0 N_{см},$$

где  $l_0$  – глубина сверления.

Суммарное время на сверление отверстий рассчитывается следующим образом:

$$\sum T_{св} = [T_{см} - (\sum t_{п} + \sum t_{н})] K_p,$$

где  $T_{см}$  – продолжительность одной смены в часах без обеденного перерыва;  $\sum t_{п}$  – суммарное время на подачу заготовок в позицию обработки;  $\sum t_{н}$  – суммарное время на подвод, перебеги и отвод инструмента;  $K_p$  – коэффициент ( $K_p < 1$ ), учитывающий простой оборудования в течение рабочей смены в связи с текущим ремонтом и техническим обслуживанием, для автоматических линий, агрегатных станков и станков автоматов  $K_p = 0,9$ .

При обработке деталей на станках с ЧПУ  $\sum T_{св}$  рассчитывается при разработке управляющей программы следующим образом:

$$\sum T_{св} = [T_{см} - (\sum t_{ум} + \sum t_{но})] K_p,$$

где  $\sum t_{ум}$  – суммарное штучное время на выполнение всех переходов обработки заготовок кроме сверления;  $K_p = 0,97$  – для станков с ЧПУ.

После расчета суммарного времени сверления отверстий определяется частота вращения шпинделя станка из равенства

$$L_{см} / S \times n = \sum T_{св},$$

где  $S$  – подача на оборот сверла;  $n$  – частота вращения шпинделя станка, тогда

$$n = \frac{L_{см}}{S \sum T_{св}}, \text{ об/мин.}$$

При наличии частоты вращения шпинделя можно вычислить скорость резания по известной формуле

$$V = \frac{\pi d n}{1000}, \text{ м/мин.}$$

Тогда зависимость для расчета минимальной скорости резания будет иметь вид:

$$V_{min} = \frac{\pi d L_{см}}{1000 \cdot S \sum T_{св}}, \text{ м/мин. (4.1)}$$

В том случае, если рассчитанная по зависимости (4.1) скорость резания будет меньше 12,8 м/мин, ее следует увеличить до этого значения.

## 4.2 Выбор подачи

На рисунке 4.1, кривые 1 и 2, зависимости наработки  $L$  от подачи, выраженной в суммарной длине просверленных отверстий, имеют горбообразный вид с максимумом при подаче  $S = 0,3$  мм/об [17, 28]. Изменение подачи относительно максимума, как в большую, так и в меньшую сторону приводит к уменьшению наработки. Однако подобной тенденции не наблюдается в случае оперирования не наработкой, а стойкостью сверл.

Эти же результаты экспериментов, представленные в виде зависимостей стойкости от подачи имеют вид ниспадающих кривых (рисунок 4.1, кривые 3 и 4), то есть при работе со скоро-



стями резания максимума стойкостной зависимости в определенном диапазоне подач с уменьшением стойкости сверл наработка возрастает, а это значит, что за меньшее время сверлится большее количество заготовок [29].

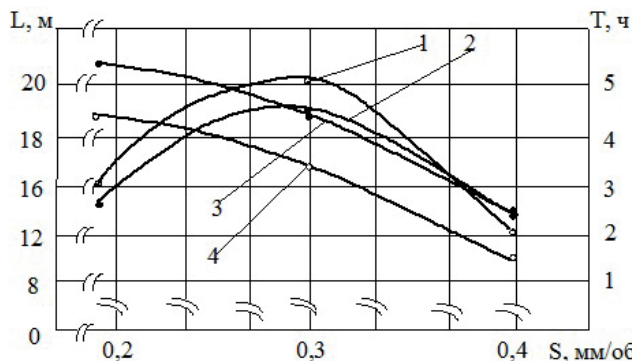


Рисунок 4.1 – Зависимость наработки и стойкости от подачи:

- 1 – зависимость наработки на скорости резания 16 м/мин;
- 2 – зависимость наработки на скорости резания 12 м/мин;
- 3 – зависимость стойкости на скорости резания 12 м/мин;
- 4 – зависимость стойкости на скорости резания 16 м/мин

При эксплуатации сверл с высокими скоростями резания подобного различия в характере зависимостей наработки и стойкости от подачи не наблюдается. Все математические зависимости скорости резания и стойкости инструмента, на которые опираются существующие нормативы и справочники по обработке сверлением, получены посредством аппроксимации правой нисходящей ветви графика стойкостной зависимости для высоких скоростей резания, больших точки перегиба в пределах нормативного периода стойкости [8]. Для примера можно привести данные справочника технолога-машиностроителя [10], согласно которому нормативный период стойкости для сверл диаметром  $d = 14,5$  мм составляет  $T = 45$  мин, подача  $S = 0,3$  мм/об. Там же предложена зависимость (1.1), с применением которой рассчитана допустимая скорость резания, равная  $V = 24,4$  м/мин (4.2).

$$V = \frac{9,8d^{0,4}}{45^{0,2}0,3^{0,5}} \cdot \quad (4.2)$$

Аналогичную скорость резания для сверл этого диаметра рекомендуют нормативы режимов резания [20].

Зависимость (1.1) получена посредством проведения экспериментов в соответствии с методикой [6] с использованием критерия износа  $h_3 = 0,5$  мм, также как и зависимости, представленные на рисунке 3.9, поэтому логично провести сравнение результатов экспериментов, по которым получена зависимость (1.1) и результатов настоящих исследований.

На рисунке 4.2, кривая 1, представлена зависимость стойкости от подачи, рассчитанная по формуле (4.2) для сверл диаметром  $d = 14,5$  мм, при скорости резания  $V = 24,4$  м/мин. Пособством перевода рассчитанных значений стойкости в соответствующие величины наработок, получена кривая 2 на рисунке 4.2, отражающая зависимость наработки от подачи при данной скорости резания.

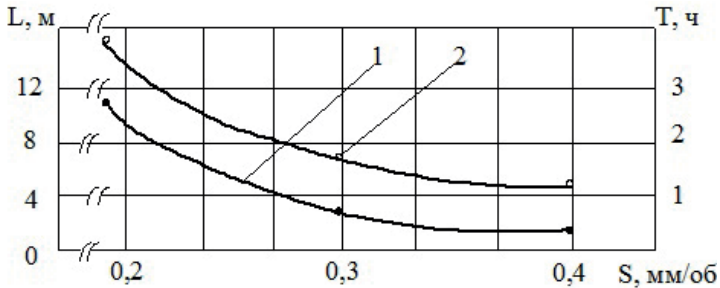


Рисунок 4.2 – Зависимости наработки и стойкости от подачи:  
1 – зависимость стойкости; 2 – зависимость наработки

На рисунке 4.2 видно, что в диапазоне высоких скоростей резания, больших точки перегиба правой, ниспадающей ветви графика стойкостной зависимости, различия в характере обеих зависимостей не наблюдается, обе зависимости имеют один монотонно убывающий характер.

На рисунке 4.3 представлены зависимости износа задних поверхностей и ленточек этих сверл от наработки [17]. Кривые износа ленточек близки к линейным, участки приработки, нор-

мального и катастрофического износа на них не выражены. Это не противоречит результатам испытаний сверл диаметром 10,2 мм. Кривые износа задних поверхностей имеют явно выраженные участки приработки. При всех подачах износ задних поверхностей достиг установленного критерия в начале участка приработки, то есть значительно раньше достижения участка катастрофического износа. Этим подтверждается вывод о неэффективности критерия износа задних поверхностей в диапазоне скоростей резания максимума стойкостной зависимости.

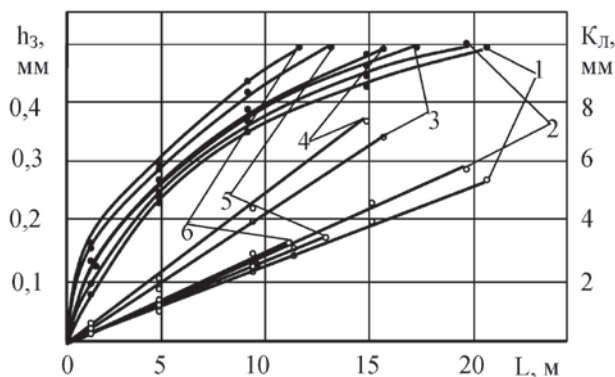


Рисунок 4.3 – Зависимости износа задних поверхностей и ленточек сверл диаметром  $d = 14,5$  мм от наработки:

- 1 –  $S = 0,3$  мм/об,  $V = 16$  м/мин (сверху кривые износа задних поверхностей, снизу – ленточек); 2 –  $S = 0,3$  мм/об,  $V = 12$  м/мин; 3 –  $S = 0,18$  мм/об,  $V = 16$  м/мин; 4 –  $S = 0,18$  мм/об,  $V = 12$  м/мин; 5 –  $S = 0,4$  мм/об,  $V = 16$  м/мин; 6 –  $S = 0,4$  мм/об,  $V = 12$  м/мин

Как уже было отмечено, при работе на скоростях резания максимума стойкостной зависимости с уменьшением подачи максимума, стойкость сверл падает. Причиной этого может быть увеличение длины пути трения ленточек сверл о стенки обработанного отверстия, что приводит к значительному увеличению интенсивности износа ленточек, как показано на рисунке 4.3, кривые 1. Возрастание интенсивности износа ленточек увеличивает вероятность защемления изношенной части сверла в обра-

батываемом отверстии. При этом, как видно на рисунке 4.3, кривые 2, интенсивность износа задних поверхностей также возросла, но в меньшей степени.

При увеличении подачи выше максимума, длина пути трения уменьшается, но нагрузка на главные режущие кромки увеличивается, при этом возрастает температура резания, что приводит к значительному увеличению интенсивности износа задних поверхностей и незначительному увеличению интенсивности износа ленточек сверл (рисунок 4.4, кривые 1 и 2). При подаче максимума интенсивность износа ленточек и задних поверхностей минимальная.

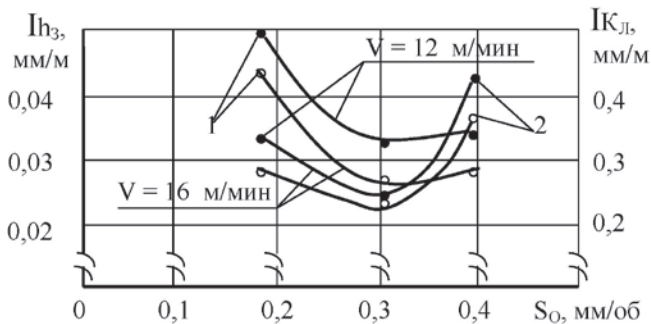


Рисунок 4.4 – Зависимость интенсивности износа задних поверхностей и ленточек от подачи: 1 – интенсивность износа ленточек; 2 – интенсивность износа задних поверхностей

Лабораторные исследования сверл диаметром 10,2 мм показали примерно равный вклад износа задних поверхностей и ленточек в формирование отказа сверл при работе со скоростями резания, соответствующими области максимума стойкостной зависимости. Лабораторные исследования проводили при подаче  $S = 0,23$  мм/об. Подача  $S = 0,3$  мм/об рекомендуется нормативами и справочниками [10, 30] для сверл диаметром 14,5 мм, так же как и подача  $S = 0,23$  мм/об для сверл диаметром 10,2 мм и может быть определена по формуле:

$$S = Cd^{0,75}, \quad (4.3)$$

где постоянный коэффициент  $C = 0,04$  при глубине сверления меньше  $3d$ , и  $C = 0,03$  – при глубине сверления больше  $3d$ .

Для сталей HB от 240 до 300 рассчитанные по формуле (4.3) подачи следует умножить на коэффициент 0,8, для сталей HB 300 и более, рассчитанные по формуле (4.3) подачи следует умножить на коэффициент 0,6.

На основании изложенного выше для сверл диаметром  $d = 14,5$  мм также можно предположить примерно равный вклад износа задних поверхностей и ленточек в формирование отказа сверл при работе со скоростями резания, соответствующими области максимума стойкостной зависимости с подачей  $S = 0,3$  мм/об. Подачи, рассчитанные по формуле (4.3), можно считать рациональными при обработке углеродистых конструкционных сталей быстрорежущими спиральными сверлами. Уменьшение подачи от рационального значения приведет к возрастанию интенсивности износа ленточек сверл, а ее увеличение – к возрастанию интенсивности износа задних поверхностей, и то и другое отрицательно скажется на работоспособности быстрорежущих спиральных сверл.

### 4.3. Стойкостная модель для типа производства

В работе [31] представлены результаты производственных испытаний спиральных сверл диаметрами от 10 до 35 мм, которые позволили получить зависимость средней стойкости от диаметра в указанном диапазоне в условиях автоматизированного массового производства:

$$\bar{T} = 3,58d^{0,4}.$$

Для определения степени влияния твердости обрабатываемых заготовок на среднюю стойкость сверл использовали результаты производственных испытаний, представленные в таблице 1.1. На примере сверл близких диаметров 9,8 и 10,5 мм, которыми обрабатывались заготовки различной твердости 200 HB и 300 HB соответственно получена зависимость, имеющая вид:

$$\bar{T} = 2,03 10^9 HB^{-3,65}.$$

Для определения степени влияния подачи на стойкость сверл использовали график зависимости, представленной на ри-

сунке 4.1, кривая 3. Аппроксимацией этой кривой в диапазоне подач от 0,18 до 0,3 мм/об получена следующая зависимость:

$$T = 2,72S^{-0,4}.$$

Тогда зависимость средней стойкости сверл от диаметра, твердости заготовок и подачи будет иметь следующий вид:

$$\bar{T} = \frac{4,4 \cdot 10^8 d^{0,4}}{S^{0,4} HB^{3,65}}. \quad (4.4)$$

В работе [32] аппроксимацией области максимума графика зависимости стойкости от скорости резания получено значение скорости резания максимума стойкости – 12,8 м/мин. Как видно в таблице 1.1, скорости резания, на которых проводились производственные испытания сверл, близки к скорости резания максимума стойкости. В работе [31] сделан вывод, что скорость резания, соответствующая максимальной стойкости быстрорежущих спиральных сверл при обработке углеродистых конструкционных сталей, остается неизменной при изменении подачи, диаметра сверла и твердости обрабатываемого материала. Поэтому зависимость (4.4) можно использовать для расчета средней максимальной стойкости спиральных сверл диаметрами 10–35 мм.

Однако спиральные сверла находят широкое применение для всех типов производства, которые характеризуются объемом выпуска изделий. С уменьшением объема выпуска, переходом от массового к серийному и единичному производству, производительность оборудования растет, что обусловлено увеличением номенклатуры изделий и переходом от автоматизированного оборудования к универсальному. Увеличение производительности оборудования возможно только за счет увеличения скоростей резания. В связи с этим, возникает проблема разработки стойкостной модели спиральных сверл с учетом случайного характера процессов изнашивания для широкого диапазона скоростей резания.

В работе [32] приведены результаты аппроксимации графика зависимости стойкости от скорости резания, полученного в лабораторных условиях. Зависимость (4.5) получена аппроксимацией верхней части правой ветви этого графика на скоростях резания 16–21 м/мин выше точки перегиба, зависимость (4.6) – на скоростях резания 21–30 м/мин, ниже точки перегиба.

$$T = 130211V^{-3,265}, \quad (4.5)$$

$$T = 213V^{-1,15}. \quad (4.6)$$

Зависимости (4.5) и (4.6) получены при проведении однофакторного эксперимента в лабораторных условиях. Как было показано в главе 2, при проведении лабораторных испытаний было максимально исключено влияние случайных факторов процесса обработки. Поэтому значения стойкостей, рассчитанных по этим зависимостям, являются максимальными по отношению к распределению стойкостей сверл в производственных условиях эксплуатации.

В работе [11] приведены коэффициенты вариации распределений восьми партий сверл разного диаметра, представленные в таблице 1.1.

Средний коэффициент вариации равен  $\bar{G} = 0,23$ . Тогда среднюю стойкость, при наличии максимальной, можно определить по формуле:

$$\bar{T} = \frac{T_{max}}{(1+3\bar{G})}, \quad (4.7)$$

где  $T_{max}$  максимальная стойкость, рассчитанная по зависимостям (4.5) и (4.6).

С применением зависимости (4.7) зависимость (4.5) примет следующий вид:

$$\bar{T} = 77048V^{-3,265}, \quad (4.8)$$

а зависимость (4.6) [33]:

$$\bar{T} = 126V^{-1,15}. \quad (4.9)$$

Используя зависимости (4.4) и (4.8) получим зависимость (4.7) для расчета средней стойкости спиральных сверл на скоростях резания 16–21 м/мин:

$$\bar{T} = \frac{3,5 \cdot 10^{12} d^{0,4}}{V^{3,265} S^{0,4} HB^{3,65}}. \quad (4.9)$$

Ранее была приведена зависимость (1.1), рекомендуемая справочником технолога-машиностроителя [10] для расчета допустимых скоростей резания при сверлении. Эта зависимость получена на интенсивных скоростях резания, больших точки перегиба графика зависимости стойкости от скорости резания

[8]. Рассчитанная по ней скорость резания при заданных подаче и периоде стойкости для любого диаметра сверла равна 24 м/мин. Зависимость (1.1) разработана комиссией по резанию металлов, в которую входили все ведущие специалисты в этой области, испытания проводились с высокой тщательностью и по единой методике, поэтому представляется целесообразным в зависимости средней стойкости на скоростях резания 21–30 м/мин использовать показатель степени при подаче 0,5 (4.2).

Используя зависимости (4.4) и (4.9) и показатель степени при подаче 0,5 получим зависимость (4.10) для расчета средней стойкости спиральных сверл на скоростях резания 21–30 м/мин:

$$\bar{T} = \frac{4,9 \cdot 10^9 d^{0,4}}{V^{1,15} S^{0,5} HB^{3,65}}. \quad (4.10)$$

Справочником технолога-машиностроителя [10] рекомендуются периоды стойкости спиральных сверл для различных диаметров. Для сверл диаметром от 10 до 35 мм рекомендуемые периоды стойкости соответствуют минимальным стойкостям, рассчитанным по зависимости (4.11) с применением зависимости (4.10) [34]. Тем самым подтверждается правомочность использования среднего коэффициента вариации  $\bar{S} = 0,23$ .

$$T_{min} = -3\bar{T}\bar{S}, \quad (4.11)$$

где  $\bar{T}$  – средняя стойкость, рассчитанная по зависимости (4.10).

В разд. 4.1 приведена зависимость (4.1) для расчета минимальной скорости резания в зависимости от объема выпуска изделий для обеспечения максимальной стойкости сверл при необходимой производительности оборудования.

Получена стойкостная модель, состоящая из зависимостей (4.1), (4.3), (4.4), (4.9), (4.10), (4.11) [35], которая работает следующим образом. Для определенного типа производства, исходя из необходимой производительности оборудования, по зависимости (4.1) рассчитывается минимальная скорость резания. Если расчетное значение скорости резания меньше 12,8 м/мин, принимается это значение скорости резания. Подача рассчитывается по зависимости (4.3).

В зависимости от значения скорости резания выбирается одна из зависимостей (4.4), (4.9) и (4.10) для расчета стойкости. Далее, используя зависимость (4.11), и средний коэффициент



вариации, равный 0,23, определяется стойкость с необходимой вероятностью безотказной работы  $\gamma$ . Для  $\gamma = 100\%$  принимается значение  $3\bar{T}\bar{g}$ , для  $\gamma = 95\%$  – значение  $2\bar{T}\bar{g}$ .

Таким образом, входными параметрами модели являются производительность оборудования и твердость обрабатываемых заготовок, а выходными параметрами – скорость резания и стойкость сверл с необходимой вероятностью безотказной работы.

Таким образом, предложена зависимость для определения скоростей резания, на которых стойкость спиральных сверл максимальная при различных типах производства, а также зависимость для расчета рациональных подач, на которых наработка сверл максимальная.

Получена стойкостная модель, учитывающая: случайный характер процессов изнашивания, тип производства, скорости резания, на которых стойкость сверл максимальная, подачи, на которых максимальная наработка.

## **ГЛАВА 5. КРИТЕРИИ ОТКАЗА. КРИТЕРИАЛЬНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ И КРИТЕРИАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ. РЕШЕНИЕ ТРЕТЬЕЙ ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **5.1 Классификация отказов, причины, виды и критерии отказов спиральных сверл**

Метод испытаний до функционального отказа, представленный в главе 2, позволил определить признаки потери работоспособности, предшествующие отказу [12, 14] ставшие основой классификации (рисунок 5.1) [36].

Различают внезапный и постепенный отказы. Внезапный отказ – это непредвиденная поломка сверла. Постепенный отказ происходит в результате постепенного накапливания повреждений в виде износа конструктивных элементов сверл. Постепенный отказ может быть двух видов: параметрический и функциональный. Параметрический отказ выражается в нарушении работоспособности в виде отклонения установленных значений хотя бы одного из параметров режущего инструмента, требований или характеристик обработки, выполняемой этим инструментом. К характеристикам обработки относят: силу резания, температуру резания, уровень вибраций и др. [37]. Таким образом, параметрический отказ может быть: стойкостной, качественный и характеристический. Стойкостной отказ выражается в достижении инструментом установленного периода стойкости. Качественный – в отклонении от установленных параметров качества обработанной поверхности. Характеристический – в отклонении от установленных характеристик обработки. Функциональный отказ выражается в полной потере работоспособности инструмента в результате износа – поломке.

Из сказанного выше вытекают причины отказов (рисунок 5.1). Причинами внезапного отказа являются: сбой станка, наличие бракованного инструмента или заготовки, например, значительное превышение допустимого смещения перемычки сверла и осевого биения режущих кромок, или наличие раковины в заготовке на пути сверления.

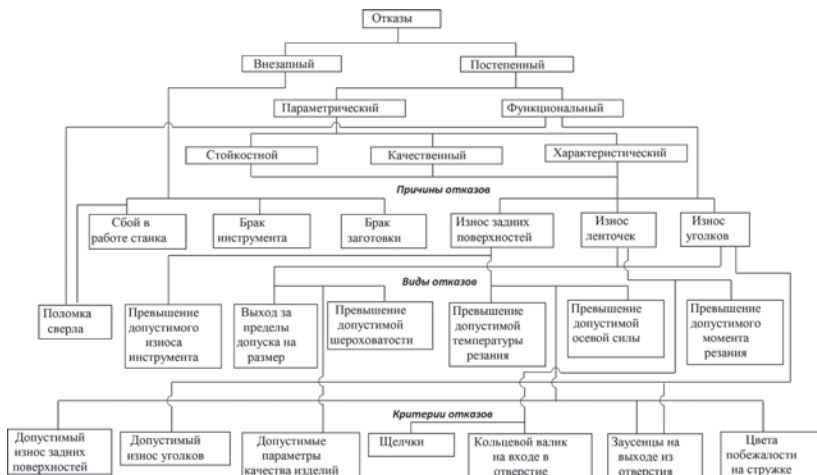


Рисунок 5.1 – Отказы, причины, виды и критерии отказов спиральных сверл

Причинами постепенного отказа спирального сверла всегда являются определенные величины износов его конструктивных элементов. В работе [3] показано, что на работоспособность спиральных сверл, в основном, влияют износы задних поверхностей лезвий, ленточек и уголков. Степень влияния указанных износов зависит от условий обработки. Износ перемычки не оказывает существенного влияния на работоспособность сверл.

По причине отказа, выраженного в износе задних поверхностей, могут произойти три вида отказов сверл: превышение допустимого износа инструмента, превышение допустимой температуры резания и превышение допустимой осевой силы.

Допустимым износом инструмента является критерий оптимального износа. Для всех инструментов – это определенная ширина фаски износа задней поверхности [9]. Критерий износа регламентируется нормативной литературой [38] и зависит от диаметра сверла. В работе [22] показано, что критерии оптимального износа оценивают работоспособность спиральных сверл, работающих на высоких скоростях резания, и не пригодны для сверл, работающих на средних и низких скоростях резания.

Допустимая температура резания для спиральных сверл из быстрорежущей стали P6M5 равна 650 °С, что является преде-

лом ее теплостойкости. Увеличение температуры резания при неизменной скорости резания непосредственно связано с увеличением осевой силы за счет увеличения износа задних поверхностей. Как показано в работах [22, 15], износ задних поверхностей, в основном, влияет на увеличение температуры резания и осевой силы при работе на высоких скоростях резания, на которых сверла выходят из строя в результате полной потери режущих свойств главных режущих кромок у уголков, и налипания обрабатываемого материала на изношенные участки задних поверхностей.

Износы ленточек и уголков взаимосвязаны [21, 4]. По причине отказа, выраженного износом этих элементов, могут произойти два вида отказов сверл: выход за пределы допуска на размер и превышение необходимой шероховатости обработанной поверхности.

В работах [22, 39] показано, что при работе сверл на средних и низких скоростях резания в результате износа ленточек и уголков наступает момент, когда диаметр обработанного отверстия становится меньше первоначального диаметра сверла, что недопустимо ни для отверстий под крепеж, ни для отверстий под дальнейшую обработку.

По причине отказа, выраженного в износе ленточек, может произойти отказ сверла в виде превышения допустимого момента резания. В работах [22, 15] показано, что износ ленточек, в основном, влияет на увеличение момента резания при работе на низких скоростях резания, на которых сверла выходят из строя в результате защемления изношенных участков ленточек в обрабатываемом отверстии, что сопровождается резким, пикообразным всплеском момента резания. Физической основой этого является адгезионное схватывание изношенных участков ленточек с обработанной поверхностью.

Отказ сверла в любом случае недопустим, т.к. приводит к поломке инструмента, простою станка и к браку при изготовлении изделия. Для предотвращения этого используют критерии отказов. Критерий отказа – это признак предельного состояния инструмента, появление которого является предвестником отказа.

Одним из критериев отказа и единственным, регламентированным нормативной документацией, является допустимый из-

нос задних поверхностей. Однако, как было сказано выше, для быстрорежущих спиральных сверл износ задних поверхностей является причиной отказа только при работе на высоких скоростях резания. При работе на средних и низких скоростях резания (6–16 м/мин) допустимый износ задних поверхностей не может быть критерием отказа сверл [22]. ГОСТом [38] этот критерий отказа регламентируется для операций предварительной обработки с невысокими требованиями к шероховатости поверхности и точности обработки. На операциях окончательной обработки, где основными требованиями к обработке являются допуски размеров, формы и расположения обработанных поверхностей, критериями отказа могут быть приняты их предельно допустимые значения [37].

В работах [12, 22] показано, что при работе сверл на низких скоростях резания (6–9 м/мин) существует более надежный критерий отказа «щелчки», которые являются результатом защемления изношенного участка ленточек в обрабатываемом отверстии. Однако этот критерий не работает при работе сверл на средних и высоких скоростях резания (12–30 м/мин).

При работе на средних скоростях резания (12–16 м/мин) критерием отказа являются заусенцы на выходной стороне отверстия и кольцевой валик на его входной стороне [12].

При работе на высоких скоростях резания, помимо допустимого износа задних поверхностей, надежным критерием отказа является появление цветов побежалости на стружке [12, 22].

Как видно из представленного выше анализа критериев отказов сверл, каждый из рассмотренных критериев действителен в определенном диапазоне скоростей резания.

В работе [40] в результате анализа взаимосвязи износов отдельных конструктивных элементов сверл, и зависимостей наработок от скорости резания с применением различных критериев отказов, предложен критерий отказа, не зависящий от скорости резания в диапазоне 9–30 м/мин. Таким критерием является допустимый износ уголков сверл. Показано, что для сверл диаметром 10 мм допустимый износ уголков равен 0,1 мм.

## 5.2 Критерии отказа

Лабораторными испытаниями определено, что на работоспособность спиральных сверл, в зависимости от скорости резания, влияют износы задних поверхностей, ленточек и уголков, износ перемычки не оказывает влияния на работоспособность сверл [3, 14].

В работах [4, 21] представлен анализ особенностей конструкции и износа спиральных сверл, существенно отличающихся от других видов режущих инструментов. Отмечено, что особенную роль в этом отличии играет уголок.

Уголок является точкой пересечения главной и вспомогательной режущих кромок сверла и линией пересечения главной задней поверхности со вспомогательной (ленточкой), поэтому он в равной мере является частью их обеих. Износ уголков сверла  $\Delta d$  представлен величиной уменьшения диаметра сверла в процессе изнашивания, как главных задних поверхностей, так и ленточек инструмента. В связи с этим можно допустить, что износ уголков характеризует величину износа, как главных задних поверхностей сверл, так и ленточек. Взаимосвязь этих износов представлена на рисунке 5.2 [40].

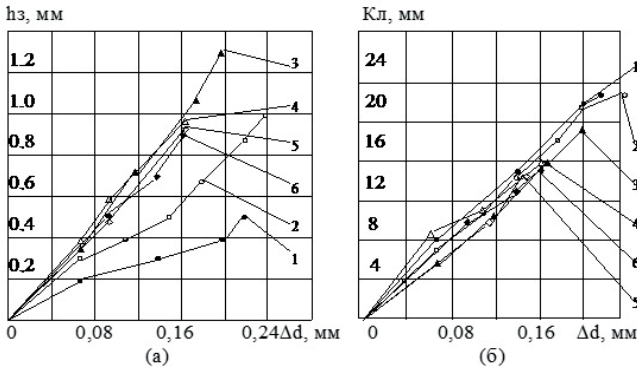


Рисунок 5.2 – Взаимосвязь износов главных задних поверхностей  $h_z$ , ленточек  $K_L$  с износом уголков  $\Delta \bar{d}$  сверл диаметром 10,2 мм: 1 – на скорости резания  $V = 9$  м/мин; 2 –  $V = 12$  м/мин; 3 –  $V = 16$  м/мин; 4 –  $V = 21$  м/мин; 5 –  $V = 26$  м/мин; 6 –  $V = 30$  м/мин

Взаимосвязь между износами задних поверхностей и уголков однозначна и не зависит от скорости резания в диапазоне скоростей резания 16–30 м/мин (рисунок 5.2, а). Взаимосвязь между износами ленточек и уголков сверл не зависит от скорости резания и практически однозначна для всего представленного на рисунке 5.2 диапазона скоростей резания.

Скорости резания, применяемые в автоматизированном массовом производстве для сверл диаметрами 10 мм и выше, не выходят за рамки скоростей резания лабораторных исследований. Это видно из результатов анализа обширных статистических материалов, представленных на рисунке 5.3 [11]. На этом рисунке скорости резания не зависят от диаметра сверл и прочих условий эксплуатации. Диапазон применяемых скоростей резания сужается с увеличением диаметра сверл.

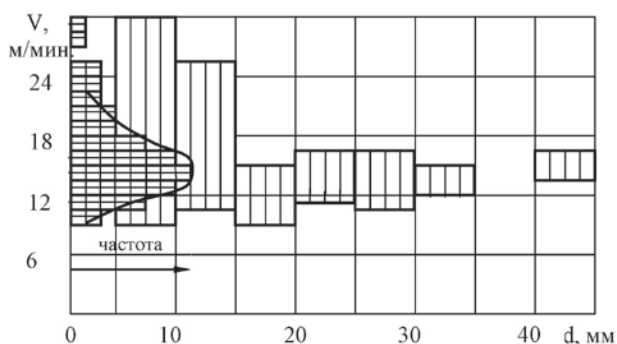


Рисунок 5.3 – Скорости резания автоматизированного массового производства

На рисунке 5.4 показаны графики стойкостных зависимостей при функциональном отказе сверл (рисунок 5.4, 1), и при достижении рекомендуемого нормативами [38] критерия износа (рисунок 5.4, 2). Критерием износа сверл данного диаметра принята ширина фаски износа задней поверхности, равная 0,45 мм [36]. Характер кривых 1 и 2 (рисунок 5.4) совпадает только в диапазоне скоростей резания 21–30 м/мин. На других скоростях резания износ задних поверхностей не может служить характеристикой состояния сверл. Подтверждением этого вывода являются признаки потери работоспособности спиральных

сверл, отмеченные в работе [14]. Характер графиков зависимостей 3 и 1 (рисунок 5.4) полностью совпадает в диапазоне скоростей резания 9–30 м/мин. Это подтверждает вывод о том, что износ уголков может служить критерием отказа быстрорежущих спиральных сверл в этом диапазоне скоростей резания.

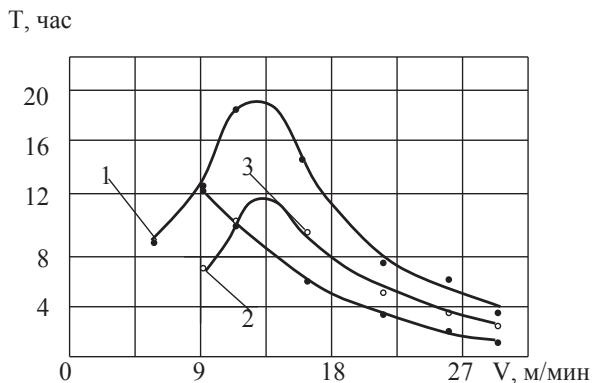


Рисунок 5.4 – Зависимости стойкости от скорости резания быстрорежущих спиральных сверл диаметром 10,2 мм: 1 – при функциональном отказе; 2 – при достижении критерия износа [38]; 3 – при достижении износа уголков величины, равной 0,12 мм, подача равна 0,23 мм/об

На основании изложенного выше можно сделать вывод, что по величине износа уголков можно судить о величине износа ленточек сверл, работающих с любыми скоростями резания, применяемыми в автоматизированном массовом производстве. Характеристикой износа задних поверхностей износ уголков может служить только на высоких скоростях резания.

### 5.3 Критериальные зависимости

#### 5.3.1 Критериальные зависимости для расчета критерия функционального отказа

Для определения тесноты связи износов ленточек и уголков сверл диаметром 10,2 мм проведен корреляционный анализ, результаты которого представлены в таблице 5.1.



Таблица 5.1 – Корреляционный анализ тесноты связи износов ленточек и уголков

$V$ , м/мин	9	12	16	21	26	30	
$r_{\Delta d K_L}$	0,98	0,997	0,99	0,98	0,98	0,9	$\bar{r}_{\Delta d K_L} = 0,97$
$\bar{C}_{\Delta d}$	0,0095	0,0109	0,0108	0,012	0,012	0,01	$\bar{C}_{\Delta d} = 0,0108$

В таблице 5.1  $r_{\Delta d K_L}$  – коэффициент корреляции износов уголков и ленточек;  $\bar{C}_{\Delta d}$  – постоянный коэффициент [41].

Корреляционный анализ показал наличие тесной линейной взаимосвязи между износами ленточек и уголков данных сверл в диапазоне скоростей резания 9–30 м/мин. Величина коэффициента корреляции лежит в пределах 0,9–0,99, при среднем значении равном 0,97.

На рисунке 5.5 представлен график, показывающий линейную зависимость средних значений износа уголков сверл диаметром 10,2 мм от износа ленточек, которую можно представить в виде:

$$\Delta \bar{d} = \bar{C}_{\Delta d} K_{L}, \text{ мм.}$$

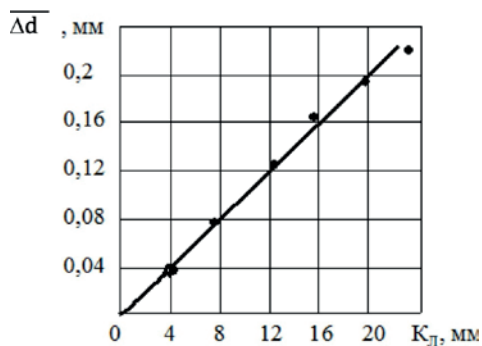


Рисунок 5.5 – Взаимосвязь среднего износа уголков  $\Delta \bar{d}$  с износом ленточек  $K_L$  сверл диаметром 10,2 мм

Величина постоянной  $\bar{C}_{\Delta d}$  существенно не изменяется при варьировании скорости резания (таблица 5.1) и в среднем равна 0,0108, на основании чего получена зависимость

$$\Delta\bar{d} = 0,0108K_{д} . \quad (5.1)$$

Из представленных в работе [40] данных производственных испытаний спиральных сверл диаметром 9,8 мм следует, что их отказы имели место при превышении износа ленточек величиной 10 мм. Износ ленточек, равный 10 мм, можно считать границей безотказной работы этих сверл. На рисунке 5.1, б можно определить величину износа уголков сверл при этой величине износа ленточек. Для износа ленточек, равном 10 мм, величина износа уголков составляет от 0,1 до 0,12 мм. Подставив значение  $K_{д} = 10$  мм в формулу (5.1), получим величину износа уголков  $\Delta\bar{d} = 0,1$  мм.

Условия производственных испытаний сверл представлены в работе [11] в таблице 2, в которой скорости резания изменяются в очень узких пределах и не зависят от диаметра сверла и прочих условий их эксплуатации. Это не противоречит результатам статистических исследований, представленных на рисунке 5.2. В работах [32, 42] различными методами определена скорость резания максимума стойкостной зависимости, равная 12,8 м/мин. Характерно, что эта скорость практически совпадает со средней скоростью резания  $\bar{V}$ , равной 12,75 м/мин (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Условия и результаты производственных испытаний

Диаметр сверла $d$ , мм	9,8	10,5	11,5	12,0	13,8	17,5	21,0	35,0
Скорость резания $V$ , м/мин	13,8	12,6	12,6	12,0	12,6	13,8	13,2	11,4
	$\bar{V} = 12,75$ м/мин							
Подача $S$ , мм/об.	0,22	0,14	0,18	0,14	0,22	0,2	0,23	0,23
Твердость деталей НВ	200	300	200	180	200	190	300	300
Глубина сверления $\ell$ , мм	25,2	28,5	13,0	14,0	11,0	24,0	17,0	36,0
Средний износ ленточек при отказе сверл $\bar{K}_{лч}$ , мм	14,4	9,7	10,1	9,4	10,5	18,9	21,0	36,0

Величина износа уголков, равная 0,1 мм, может быть принята критерием допустимого износа сверл диаметром 10 мм. Критерий гарантирует безотказную работу быстрорежущих

спиральных сверл данного диаметра при обработке углеродистых конструкционных сталей на скоростях резания (таблица 2, [11]). При этом удаление 10-миллиметрового участка направляющей части сверла при заточке будет гарантировать полное восстановление работоспособности инструмента, а значит и максимальную суммарную стойкость (срок службы) [43].

На рисунке 5.2, *a* минимальная величина износа задних поверхностей в диапазоне скоростей 21–30 м/мин при принятом критерии допустимого износа уголков  $\Delta\bar{d} = 0,1$  мм равна 0,45 мм, что соответствует нормативному критерию износа сверл этого диаметра [38] и подтверждает достоверность принятого критерия допустимого износа. Величина износа уголков может быть измерена без снятия сверла со станка, что дает возможность автоматизации контроля состояния инструмента в процессе эксплуатации.

Для выбора критерия допустимого износа сверл других диаметров, необходимо использовать величины среднего износа ленточек при отказе сверл, полученные в результате производственных испытаний, представленные в таблице 5.2 и на рисунке 5.6 [44].

Зависимость, показанную на рисунке 5.6 можно представить в следующем виде:

$$\bar{K}_{ло} = 1,04d \text{ мм.} \quad (5.2)$$

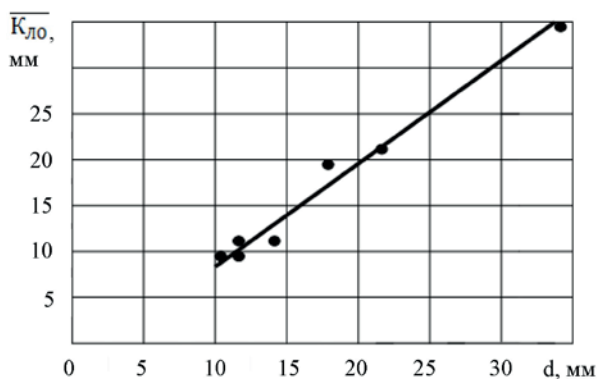


Рисунок 5.6 – Зависимость средней величины износа ленточек при отказе сверл от их диаметра

Корреляционный анализ показал тесную связь диаметров всех сверл, представленных в таблице 5.2, с их средними величинами износа ленточек. Коэффициент линейной корреляции Пирсона равен 0,92 при доверительном интервале 0,621–0,928. Как видно в таблице 5.2, величина среднего износа ленточек примерно равна диаметру сверла.

Среднее отношение  $\frac{\sum \frac{\bar{K}_{ЛО}}{d_i}}{n} = 0,99$ . Отношение средних величин  $\frac{\bar{K}_{ЛО}}{d} = 1,1$ , то есть с большой достоверностью можно при-

нять среднюю величину износа ленточек при функциональном отказе, равной величине диаметра сверл, это может быть связано с прочностью сверла, зависящей от его диаметра. В работе [18] по результатам производственных испытаний получен средний коэффициент вариации распределений износа ленточек при отказе сверл  $\bar{g}_{кл}$ , равный 0,225. Тогда среднеквадратическое отклонение  $\sigma_{кл}$  можно определить по формуле:

$$\sigma_{кл} = d \cdot \bar{g}_{кл}.$$

Это значит, что износ ленточек сверл с учетом рассеивания с 95 % вероятностью безотказной работы можно определить по формуле:

$$K_{л\gamma 0,95} = d - 2\sigma_{кл} \quad \text{или} \quad K_{л\gamma 0,95} = d \cdot (1 - 2g_{кл}),$$

то есть

$$K_{л\gamma 0,95} = 0,55d, \text{ мм.} \quad (5.3)$$

Используя зависимости (5.1)–(5.3) можно определить значение критерия допустимого износа  $\Delta d_o$  в зависимости от диаметра сверла с 95 % вероятностью безотказной работы инструмента ( $\gamma = 0,95$ ) в виде

$$\Delta d_{o\gamma 0,95} = 0,55 \cdot 0,0108 \cdot 1,04d, \text{ мм,}$$

после перемножения постоянных коэффициентов, получим:

$$\Delta d_{o\gamma 0,95} = 0,0062d, \text{ мм.} \quad (5.4)$$

### 5.3.2 Критериальные зависимости для расчета критерия технологического отказа

На рисунке 5.7 [39] представлены графики зависимостей разбивки обрабатываемых отверстий  $\Delta$  от наработки  $L$  сверл диаметром 10,2 мм. Разбивка определялась разностью диаметра просверленного отверстия и первоначального диаметра сверла. При сверлении со скоростями 16 м/мин и ниже после определенной наработки ( $L_{кр}$ ) разбивка отверстий становится отрицательной (рисунок 5.7), то есть диаметр просверленного отверстия становится меньше первоначального диаметра сверла. Отрицательная разбивка недопустима. Поэтому момент перехода от положительной разбивки к отрицательной ( $L_{кр}$ ) является определяющим признаком критерия технологического износа – когда эксплуатация инструмента должна быть прекращена.

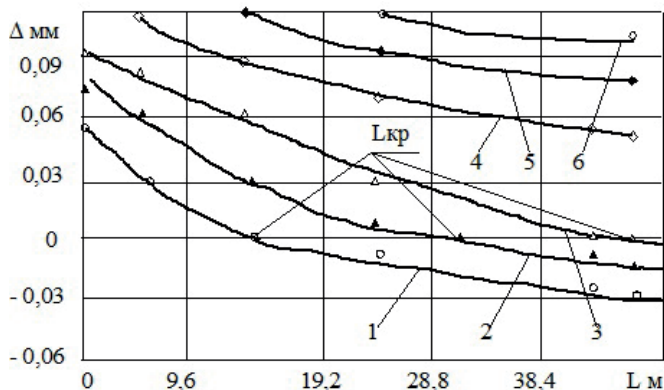


Рисунок 5.7 – Зависимость разбивки отверстия от наработки сверл: 1 –  $V = 9$  м/мин; 2 –  $V = 12$  м/мин; 3 –  $V = 16$  м/мин; 4 –  $V = 21$  м/мин; 5 –  $V = 26$  м/мин; 6 –  $V = 30$  м/мин

На рисунке 5.8 приведена зависимость величины износа задних поверхностей  $h_3$  кр, ленточек  $K_L$  кр, и уголков  $\Delta d$  кр сверл, диаметром 10,2 мм от скорости резания при достижении отрицательной разбивки.

На рис. 5.8 видно, что величина износа задних поверхностей при достижении отрицательной разбивки варьируется от 0,16 мм до 0,6 мм. Износ задних поверхностей равный 0,6 мм превышает рекомендуемый нормативами [38] критерий износа равный 0,45 мм, и в этом случае не может служить критерием технологического отказа. Это подтверждает вывод о том, что износ задних поверхностей в этом диапазоне скоростей резания не является преобладающим в потере работоспособности сверл.

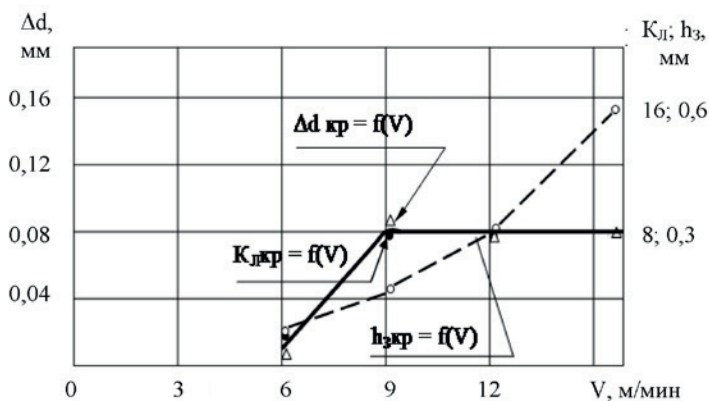


Рисунок 5.8 – Влияние скорости резания на величину износа конструктивных элементов сверл при достижении отрицательной разбивки

Графики зависимостей величин износа ленточек  $K_{дкр}$  и уголков  $\Delta d_{кр}$  от скорости резания при достижении отрицательной разбивки существенно отличаются от графика зависимости износа задних поверхностей от скорости резания (рисунок 5.8). Вид графиков зависимостей  $K_{дкр} = f(V)$  и  $\Delta d_{кр} = f(V)$  абсолютно идентичен, а в диапазоне скоростей 9–16 м/мин кривые обоих графиков параллельны оси абсцисс. Совпадение характеров графиков этих зависимостей может быть результатом тесной линейной взаимосвязи между износами ленточек и уголков сверл, показанной выше. Кривые на рисунке 5.8 показывают, что для сверл диаметром 10,2 мм, износ уголков равный 0,08 мм, может служить критерием

технологического износа в диапазоне скоростей резания 9–16 м/мин, в основном применяемых в автоматизированном массовом производстве (рисунок 5.2) [11].

Выше была показана тесная взаимосвязь средних износов ленточек при отказе сверл с их диаметрами, коэффициент линейной корреляции Пирсона равен 0,92 при доверительном интервале 0,621–0,928. Тогда величину критерия технологического износа  $\Delta d_{T_0}$  можно определить по формуле:

$$\Delta d_{T_0} = 0,008d, \text{ мм.} \quad (5.5)$$

С учетом среднего, коэффициент вариации стойкости сверл составляет  $\bar{\vartheta}_{\text{кл}} = 0,225$ , получим зависимость для расчета критерия технологического износа с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 0,95$ :

$$\Delta d_{T_0, \gamma 0,95} = 0,0046 \text{ мм.} \quad (5.6)$$

Как было отмечено выше, нормативами [38] регламентируются критерии износа спиральных сверл в виде определенной ширины фаски износа задней поверхности в зависимости от диаметра сверла. Другие условия обработки не учитываются. Это подтверждается анализом производственных испытаний, приведенных в работах [13, 20], из которого следует, что износ задних поверхностей и ленточек сверл имеет значимую корреляционную связь только с диаметром сверл. Другие условия обработки значимых связей с износом сверл не имеют.

Полученные критериальные зависимости (5.4) и (5.6) могут быть использованы для расчета критериев функционального и технологического отказов быстрорежущих спиральных сверл. Однако в процессе сверления необходимо периодически контролировать диаметр просверленных отверстий, что значительно проще, чем контролировать износ сверл и его легко автоматизировать при обработке деталей на автоматических линиях, агрегатных станках и станках с ЧПУ в условиях автоматизированного производства.

### 5.3.3 Критериальные зависимости для типа производства

Анализ результатов лабораторных исследований, представленных в работе [25], позволил установить зависимость величины износа уголков при функциональном отказе сверл от скорости резания, график которой показан на рисунке 5.9. На этом рисунке видно, что скорость резания оказывает влияние на максимальную величину износа уголков в диапазоне 6–21 м/мин. В диапазоне скоростей резания 21–30 м/мин такого влияния не наблюдается.

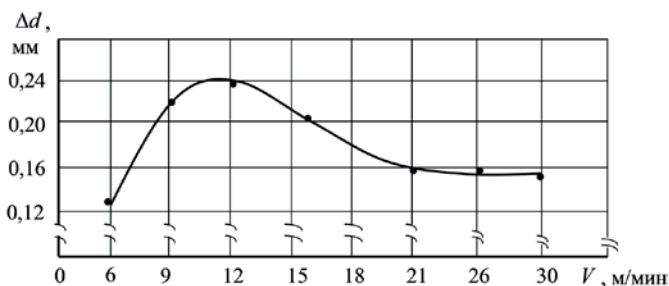


Рисунок 5.9 – Зависимость максимального износа уголков сверл, диаметром 10,2 мм от скорости резания при функциональном отказе

Это подтверждают результаты исследований, представленные в работе [40], которые выявили тесную взаимосвязь износов уголков и задних поверхностей на этих скоростях резания. Как известно, существующие критерии оптимального износа, рекомендуемые нормативной документацией, не зависят от скорости резания [38]. Корреляционный анализ результатов производственных испытаний сверл, выполненный в работе [32], показал, что износ задних поверхностей имеет значимую связь только с диаметром сверл.

В работе [32] для аппроксимации областей максимумов (вершин горбов) кривых графиков подобных зависимостей применимы зависимости (5.7) и (5.8), степень точности при аппроксимации которых, зависит от характера кривой:

$$\Delta d = aV^b e^{-cV}, \quad (5.7)$$



$$\Delta d = \Delta d_m \left( V^a e^{-V^b} \right)^n, \quad (5.8)$$

где  $\Delta d_m$  – максимальное значение  $\Delta d$  на кривой (рисунок 5.9);  $a$  – константа (5.7);  $a, b, C, n$  – показатели степени (5.8).

Константа и показатели степени зависимости (5.7) находятся посредством решения системы логарифмических уравнений с координатами  $\Delta d_i$  и  $V_i$  произвольно выбранных точек на аппроксимируемой кривой. В результате решения этих уравнений получены формулы для расчета показателей степени в виде:

$$b = \frac{(V_2 - V_1)(\ln \Delta d_3 - \ln \Delta d_1) + (V_1 - V_3)(\ln \Delta d_2 - \ln \Delta d_1)}{(\ln V_2 - \ln V_1)(V_1 - V_3) + (V_2 - V_1)(\ln V_3 - \ln V_1)},$$

$$C = \frac{b(\ln V_2 - \ln V_1) - (\ln \Delta d_2 - \ln \Delta d_1)}{(V_2 - V_1)}.$$

Константа находится посредством решения логарифмического уравнения

$$\ln a = \ln \Delta d_1 - b \ln V_1 + C V_1.$$

В результате аппроксимации кривой, представленной на рисунке 5.9 в диапазоне скоростей резания  $V = 9-16$  м/мин зависимостью (5.7) получено следующее математическое выражение:

$$\Delta d = 0,0027V^{3,103} e^{-0,2688V} \quad (5.9)$$

В таблице 5.3 представлены фактические и рассчитанные по зависимости (5.9) значения стойкости и погрешности расчетов.

Таблица 5.3 – Фактические, и рассчитанные значения стойкости, и погрешности расчетов

Скорость резания $V$ , м/мин	9	12	16
Износ уголков $\Delta d$ факт., мм	0,22	0,24	0,2
Износ уголков $\Delta d$ расч., мм, по формуле (5.9)	0,2196	0,2394	0,1995
Погрешность расчетов, %	0,18	0,25	0,25

Данные таблицы 5.3 показывают, что зависимость (5.9) дает высокую точность расчетов, средняя погрешность которых составляет 0,226 %.

Показатели степени зависимости (5.8) находятся следующим образом:

$$b = \frac{1}{\ln V_M}, \alpha = \frac{e}{\ln V_M},$$

где  $V_M$  скорость резания максимума графика зависимости (рисунок 5.9).

Для определения показателя степени находятся значения

$$n_i = \frac{\ln \frac{\Delta d_i}{\Delta d_m}}{\ln(V_i^a e^{-V_i^b})}$$

для всех точек кроме  $\Delta d_m$  и  $V_M$ , а затем найденные значения усредняются.

После определения показателя степени  $n$  значение  $\Delta d_m$  уточняется. Для этого рассчитываются значения  $\Delta d_{mi}$  по формуле:

$$\Delta d_{mi} = \frac{\Delta d_i}{(V_i^b e^{V_i^c})^n},$$

а затем найденные значения  $\Delta d_{mi}$  усредняются.

В работе [45] представлены методы определения скорости резания максимума горбообразных зависимостей, применение которых позволило определить скорость резания максимума  $V_M$  графика зависимости, представленного на рисунке 5.9, которая равна 11,1 м/мин. На этой скорости резания величина износа уголков  $\Delta d_m$  равна 0,24 мм.

Практически значения износа уголков на скорости  $V_M$  и на скорости 12 м/мин совпадают, что не позволяет получить значение степени  $n$  на этой скорости, т.к. логарифм единицы равен нулю, поэтому аппроксимировать график, представленный на рисунке 5.9, зависимостью (5.8) не представляется возможным.

В работе [32] показано, что ниспадающие ветви графиков подобных представленной на рисунке 5.9 зависимости с достаточной степенью точности аппроксимируются степенной и экспоненциальной зависимостями (5.10) и (5.11):

$$\Delta d = aV^b, \quad (5.10)$$

$$\Delta d = ae^{bV}. \quad (5.11)$$

При аппроксимации кривой, представленной на рисунке 5.9 в диапазоне скоростей резания 16–21 м/мин, получены следующие зависимости (5.12) и (5.13):

$$\Delta d = 1,91V^{-0,815}, \quad (5.12)$$

$$\Delta d = 0,4e^{-0,044V}. \quad (5.13)$$

В таблице 5.4 представлены фактические и рассчитанные по зависимостям (5.12) и (5.13) значения стойкости и погрешности расчетов.

Таблица 5.4 – Фактические и рассчитанные значения стойкости и погрешности расчетов

Скорость резания $V$ , м/мин	16	21
Износ уголков $\Delta d$ факт., мм	0,2	0,16
Износ уголков $\Delta d$ расч., мм, по формуле (5.12)	0,1994	0,1597
Погрешность расчетов, %	0,3	0,19
Износ уголков $\Delta d$ расч., мм, по формуле (5.13)	0,1978	0,1588
Погрешность расчетов, %	1,1	0,75

Меньшую погрешность расчетов дает зависимость (5.12), средняя погрешность расчетов которой составила 0,245 %, при максимальном значении 0,3 %. Тогда как средняя погрешность расчетов зависимости (5.13) составила 0,925 % при максимальном значении 1,1 %.

Математические выражения (5.9) и (5.13) описывают зависимость максимального износа уголков сверл диаметром 10,2 мм от скорости резания в скоростном диапазоне от 9 до 21 м/мин. В этот диапазон входят скорости резания, используемые в автоматизированном массовом производстве, и крупносерийном и серийном производствах.

Представленные математические зависимости получены при аппроксимации результатов лабораторных исследований. В лабораторных условиях проводился однофакторный эксперимент. Варьировалась скорость резания, а все остальные параметры были строго фиксированными и идентичными. Сверла

специально изготавливали из одной плавки быстрорежущей стали по одной технологии и отбирали по идентичности геометрических параметров, затачивали по двухплоскостной заточке с доводкой алмазным инструментом. Обработывали заготовки из одной плавки стального горячекатаного проката. Обработка отверстий велась на высокоточном станке с ЧПУ мод. 2P135Ф2. При установке сверл в шпиндель станка, контролировались осевые и радиальные биения режущих кромок, которые практически были равны нулю. Таким образом, было полностью исключено влияние случайных факторов процесса обработки. Поэтому значения износов уголков, показанные на рисунке 5.9, являются максимально допустимыми для сверл данного диаметра.

В производственных условиях влияние случайных факторов процесса обработки определяет случайный характер процессов изнашивания конструктивных элементов сверл, в результате чего имеет место существенное рассеивание стойкости. Анализ результатов производственных испытаний, представленный в работе [12], показывает, что во всех случаях распределение износов сверл нормальное и хорошо согласуется с законом нормального распределения Гаусса. Известно, что при нормальном распределении коэффициент вариации не может превышать значения 0,33, а использование его максимального значения гарантирует попадание всех возможных значений случайной величины под кривую нормального распределения. Тогда, используя правило трех сигма, мы имеем следующую зависимость:

$$\Delta d_{max} = \overline{\Delta d} + 3\sigma$$

где  $\Delta d_{max}$  – максимально допустимые значения износов уголков;  $\sigma$  – среднее квадратическое отклонение;  $\sigma = \overline{\Delta d} \cdot \mathcal{V}$ , где  $\mathcal{V}$  – коэффициент вариации, тогда  $\overline{\Delta d} = 0,503\Delta d_{max}$ .

С учетом изложенного выше, зависимости (5.9) и (5.12) можно представить в следующем виде:

$$\overline{\Delta d} = 0,0136V^{3,103} e^{-0,2688V}, \quad (5.14)$$

$$\overline{\Delta d} = 0,961V^{-0,815}. \quad (5.15)$$

В работе [41] получены математические выражения и средних коэффициентов вариации, используя которые и формулы (5.14) и (5.15), можно определить значения критерия допустимо-

го износа  $\Delta d_0$  в зависимости от скорости резания и диаметра сверла с 95 % вероятностью безотказной работы инструмента ( $\gamma = 0,95$ ) в следующем виде:

$$\Delta d_{0\gamma,0,95} = 7,095 \cdot 10^{-5} V^{3,103} e^{-0,2688V} d, \quad (5.16)$$

$$\Delta d_{0\gamma,0,95} = 5,217 \cdot 10^{-2} V^{-0,815} d, \quad (5.17)$$

$$\Delta d_{0\gamma,0,95} = 0,0062d. \quad (5.18)$$

В предыдущей главе рассмотрен способ выбора рациональной подачи, обеспечивающей максимальную стойкость быстрорежущих спиральных сверл, и предложена зависимость для ее расчета

$$S = Cd^{0,75}, \quad (5.19)$$

а также предложен способ выбора минимальной скорости резания, обеспечивающей программу выпуска конкретных изделий, и разработана зависимость для ее расчета

$$V = \frac{\pi d L_{cm}}{1000 \cdot S \cdot \Sigma T_{св}}. \quad (5.20)$$

В работе [24] приведены результаты лабораторных исследований быстрорежущих спиральных сверл диаметром 10,2 мм, показавшие, что при достижении нормативной величины износа главных задних поверхностей, износ ленточек значительно превысил нормативную величину стачивания не зависимо от скорости резания. В работе [18] представлены способы эксплуатации и восстановления спиральных сверл, экономическая целесообразность которых возможна только при полном удалении дефектов износа ленточек сверл при заточке. Поэтому для обеспечения безотказной работы спиральных сверл после заточек необходимо обеспечить полное удаление дефектов износа ленточек при их выполнении.

На рисунке 5.6 представлена зависимость среднего износа ленточек при отказе сверл от их диаметров. Методом наименьших квадратов [48] получены три уравнения регрессии:

$$\overline{K_{ЛО}} = 0,971d, \quad (5.21)$$

$$\overline{K_{ЛО}} = 0,95d^{1,01}, \quad (5.22)$$

$$\overline{K_{ЛО}} = 6,2e^{0,052d}. \quad (5.23)$$

В работе [48] представлен метод оценки силы связи уравнений регрессии с экспериментальными данным выборочными коэффициентами корреляции с использованием найденных значений коэффициентов регрессии. В таблице 5.5 показаны коэффициенты корреляции, рассчитанные предложенным методом, и средняя погрешность расчетов по каждой из полученных зависимостей.

Таблица 5.5 – Коэффициенты корреляции и погрешность расчетов

Зависимость	Коэффициент корреляции	Средняя погрешность расчетов в %
Зависимость (5.21)	0,9	14,68
Зависимость (5.22)	0,9	14,79
Зависимость (5.23)	0,91	18,42

Очевидно, что все три уравнения имеют достаточно высокий коэффициент корреляции, но наименьшая погрешность расчетов получена при использовании формулы (5.21).

В работе [49] на основании анализа лабораторных исследований стойкости и износа сверл диаметром 10,2 мм приведены величины износа их задних поверхностей и ленточек при функциональном отказе. Зависимости величин износа при функциональном отказе сверл от скорости резания показаны на рисунке 5.10.

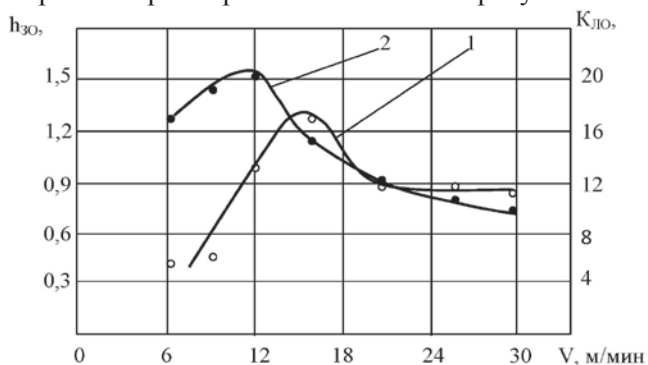


Рисунок 5.10 – Зависимости величин износа до функционального отказа сверл диаметром 10,2 мм от скорости резания:  
1 – износ задних поверхностей; 2 – износ ленточек

На рисунке 5.10 видно, что обе зависимости имеют горбообразный характер с точкой максимума. При этом их точки максимума не совпадают, скорость максимума зависимости износа ленточек  $\overline{K_{ЛО}}$  от скорости резания более низкая и соответствует 12 м/мин, чем подтверждается превалирующее влияние износа ленточек при эксплуатации сверл в диапазоне низких скоростей резания (до 12 м/мин). В диапазоне высоких скоростей резания (21 м/мин и выше) износ задних поверхностей  $h_{30}$  до функционального отказа сверл не зависит от скорости резания, что не противоречит существующим нормативам [38], согласно которым критерий износа сверл зависит только от их диаметра, и не зависит от прочих условий обработки. Практический интерес представляет правая ниспадающая ветвь графика зависимости износа ленточек до функционального отказа сверл от скорости резания (кривая 2, рисунок 5.10). Посредством аппроксимации зависимости износа ленточек при функциональном отказе сверл от скорости резания получены уравнения:

$$K_{ЛО} = 240,1V^{-1}, \quad (5.24)$$

$$K_{ЛО} = 88,7V^{-0,642}, \quad (5.25)$$

$$K_{ЛО} = 23,855e^{-0,029V}. \quad (5.26)$$

Зависимость (5.24) описывает кривую графика 2, на рисунке 5.10 в диапазоне скоростей резания 12–16 м/мин, зависимости (5.25) и (5.26) получены для диапазона скоростей резания 16–30 м/мин. В таблице 5.6 представлены фактические и рассчитанные по формулам (5.24)–(5.26) величины износа ленточек при функциональном отказе сверл и погрешности расчетов.

Анализ данных таблицы 5.6 показывает, что для описания правой ветви графика 2 на рисунке 5.10, следует выбрать зависимости (5.24) и (5.26). Средняя погрешность расчетов по формуле (5.24) составила 0 %. Средняя погрешность расчетов по формуле (5.26) составила 0,56 %, а по формуле (5.25) – 1,04 %.

Используя зависимости (5.24) и (5.26) и ранее полученную зависимость (5.9), получим следующие выражения:

$$\overline{K_{ЛО}} = 12,73dV^{-1}, \quad (5.27)$$

$$\overline{K_{ЛО}} = 1,17de^{-0,029V}. \quad (5.28)$$

Таблица 5.6 – Фактические и расчетные по формулам (5.24)–(5.26) величины износа ленточек при отказе сверл и погрешности расчетов

Скорость резания $V$ , м/мин	12,0	16,0	21,0	26,0	30,0
Износ $K_{\text{ЛО}}$ факт., мм	20	15	13	11	10
Износ $K_{\text{ЛО}}$ расч., м, по формуле (5.24)	20,00	15,00			
Погрешность расчетов, %	0	0			
Износ $K_{\text{ЛО}}$ расч., мм, по формуле (5.25)		14,96	12,56	10,95	9,99
Погрешность расчетов, %		0,27	3,37	0,43	11,22
Износ $K_{\text{ЛО}}$ расч., м, по формуле (5.26)		14,99	12,97	11,55	9,99
Погрешность расчетов, %		0,005	0,2	4,76	0,1

Зависимость (5.27) предназначена для расчета среднего износа ленточек до функционального отказа сверл в диапазоне скоростей резания 12–16 м/мин, а зависимость (5.28) – для диапазона скоростей резания 16–30 м/мин.

В таблице 5.7 приведены результаты расчета среднего износа ленточек до функционального отказа сверл по зависимости (5.27) и погрешности расчетов.

Таблица 5.7 – Фактические и расчетные по формуле (5.27) средние величины износа ленточек при отказе сверл и погрешности расчетов

Диаметр сверла, $d$ мм	9,8	10,5	11,5	12,0	13,8	17,5	21,0	35,0
$V$ , м/мин	13,8	12,6	12,6	12,0	12,6	13,8	13,2	11,4
Износ $\overline{K_{\text{ЛО}}}$ факт., мм	14,4	9,7	10,1	9,4	10,5	18,9	21,0	36,0
Износ $\overline{K_{\text{ЛО}}}$ расч., мм	20,28	11,64	11,07	9,4	9,58	14,9	13,2	11,78
Погр. расчетов, %	37,2	5,83	9,82	26,2	24	14,58	3,56	7,69

Средняя погрешность расчетов составила 16,11 %.

Данные таблицы 5.7 показывают, что скорости резания в производственных условиях в основном не выходят за пределы диапазона скоростей резания 12–14 м/мин.



Износ ленточек, обеспечивающий полное удаление дефектов износа с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 0,95$  можно рассчитать по формуле:

$$K_{Л\gamma,0,95} = \overline{K_{ЛО}}(1 - 2,9),$$

где  $\mathcal{S}$  – коэффициент вариации распределения износа ленточек. Известно, что при нормальном распределении коэффициент вариации не может превысить значение 0,33 [50], а величина рассеивания стойкости и износа спиральных сверл во многом зависит от качества изготовления и заточки их режущей части [51]. В работе [12] представлены полученные производственными испытаниями коэффициенты вариации распределений износов ленточек спиральных сверл различных диаметров (таблица 5.8).

Таблица 5.8 – Коэффициенты вариации распределений износов ленточек

Показатели	Диаметр сверла d, мм							
	9,8	10,5	11,5	12,0	13,8	17,5	21,0	35,0
Коэффициент вариации $\mathcal{S}_{K_{ЛО}}$	0,22	0,19	0,26	0,3	0,3	0,15	0,16	0,22

Данные таблицы 5.8 показывают, что коэффициенты вариации не превышают значения 0,33. Средний коэффициент вариации распределения износов ленточек, равен 0,225 при котором

$$K_{Л\gamma,0,95} = 0,55 \overline{K_{ЛО}},$$

тогда зависимости (5.27) и (5.28) примут следующий вид:

$$K_{Л\gamma,0,95} = 7,0dV^{-1}, \quad (5.29)$$

$$K_{Л\gamma,0,95} = 0,64de^{-0,029V}. \quad (5.30)$$

Зависимость (5.29) предназначена для расчета износа ленточек с вероятностью безотказной работы  $\gamma = 0,95$  в диапазоне скоростей резания 12–16 м/мин, а зависимость (5.30) – для диапазона скоростей резания 16–30 м/мин.

В случае необходимости уменьшения периода эксплуатации сверл между заточками, предлагаются зависимости (15.31)–(15.33) для расчета средней интенсивности изнашивания быстро-режущих спиральных сверл:

$$\overline{I_{\text{Кло}}} = 3,5 \times 10^7 V^{-11,38} e^{0,7158V} d^{0,85}, \quad (5.31)$$

$$\overline{I_{\text{Кло}}} = 0,016 e^{0,084V} d^{0,85}, \quad (5.32)$$

$$\overline{I_{\text{Кло}}} = 0,098 e^{-0,001V} d^{0,85}. \quad (5.33)$$

Используя их можно рассчитать среднюю величину износа ленточек по формуле:

$$\overline{K_{\text{ЛО}}} = L \overline{I_{\text{Кло}}},$$

где  $L$  – период эксплуатации между заточками.

Зависимости (5.16–5.20, 5.29, 5.30) представляют собой математическую модель, полученную эмпирическим способом, в которой входящими параметрами являются скорость резания, подача и диаметр сверла, а выходящим – критерий допустимого износа и износ ленточек с 95 % вероятностью безотказной работы. Реализация модели осуществляется следующим образом. Для определенного типа производства, исходя из необходимой производительности оборудования, по зависимости (5.20) рассчитывается минимальная скорость резания. Если расчетное значение скорости резания меньше 12,8 м/мин, принимается это значение скорости резания. Подача рассчитывается по зависимости (5.19). Затем по зависимостям (5.16)–(5.18) рассчитывается критерий допустимого износа, обеспечивающий безотказную работу сверл, а по зависимостям (5.29, 5.30) рассчитывается величина износа ленточек, обеспечивающая полное удаление дефектов износа при заточке. Зависимости предназначены: (5.16, 5.29) – для автоматизированного массового производства, (5.17, 5.30) – для крупносерийного и серийного и производств, (5.18, 5.30) – для мелкосерийного и единичного производств.

Таким образом, проведенные исследования позволили сделать следующие выводы.

Разработана классификация, включающая отказы, причины, виды и критерии отказов, и их взаимосвязи. Проведен анализ критериев отказов быстрорежущих спиральных сверл в зависимости от условий их эксплуатации, и предложены критерии отказов не вошедшие в число регламентированных ГОСТом [37]. Представлен критерий отказа быстрорежущих спиральных сверл, не зависящий от условий их эксплуатации.

Разработаны критериальные зависимости для расчета критериев функционального и технологического отказов быстрорежущих спиральных сверл для условий автоматизированного массового производства, а также для расчета критериев функционального отказа с необходимой вероятностью безотказной работы для различных типов производства с учетом условий обработки сверлением и полного удаления дефектов износа при заточке.

Разработана стойкостная модель, учитывающая: случайный характер процессов изнашивания, тип производства, скорости резания, на которых стойкость сверл максимальная, подачи, на которых максимальная наработка.

Разработаны критерии отказа быстрорежущих спиральных сверл и критериальные зависимости, учитывающие случайный характер процессов изнашивания и условия эксплуатации спиральных сверл.

Предложены способы, определяющие скорости резания максимальной стойкости и наработки спиральных сверл без проведения стойкостных испытаний: минимумом зависимостей сил и моментов резания от скорости резания при работе сверлами с наличием износа; минимумом зависимостей интенсивности изнашивания ленточек и уголков от скорости резания; максимумом зависимости высоты нароста на уголках от скорости резания.

Разработана классификация способов определения скоростей резания, на которых стойкость и наработка спиральных сверл максимальная.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Рагрин Н.А.* Классификация способов повышения стойкости спиральных свёрл // *Техника машиностроения*. М., 2013. № 2(86). С. 20–25.

2. *Древаль А.Е., Ткаченко И.В., Рагрин Н.А.* Модели отказов спиральных сверл // *Проблемы эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей промышленности*. М., 1992. С. 55–62.

3. *Рагрин Н.А.* Физическая модель стойкостной зависимости // *Технология машиностроения*. 2012. № 11. С. 11–17.

4. *Рагрин Н.А.* Особенности процесса резания и износа при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами // *Машиностроитель*. М., 2012. № 10. С. 48–51.

5. *Древаль А.Е., Рагрин Н.А., Самсонов В.А.* Формирование отказов спиральных сверл в условиях автоматизированного производства [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.technomag.edu.ru/index.html>.

6. Методика экспериментальных исследований по определению исходных данных для разработки общемашиностроительных нормативов режимов резания по основным видам обработки. М.: НИИМАШ, 1982. 159 с.

7. *Рагрин Н.А.* Определение работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // *Машиностроитель*. М., 2012. № 3. С. 31–33.

8. *Грановский Г.И., Грановский В.Г.* Резание металлов. М.: Высшая школа, 1985. С. 143–144.

9. *Бобров В.Ф.* Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.

10. *Справочник технолога-машиностроителя*. Т. 2. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2001. С. 176–279.

11. *Рагрин Н.А.* Применение теории корреляции для получения зависимостей наработки от условий обработки сверлением // *Машиностроение и инженерное образование*. 2013. С. 21–29.

12. *Рагрин Н.А.* Обеспечение безотказности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // *Машиностроитель*. М., 2012. № 7. С. 37–39.

13. *Даниелян А.М.* Резание металлов и инструмент. М.: Машгиз, 1950. 250 с.

14. *Рагрин Н.А.* Признаки потери работоспособности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // Техника и технология: новые перспективы развития: матер. III межд. научно-практич. конф. М.: Спутник +, 2011. С. 55–58.

15. *Рагрин Н.А.* Влияние скорости резания и износа рабочих элементов быстрорежущих спиральных сверл на динамические характеристики процесса сверления // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2008. № 14. С. 51–53.

16. *Рагрин Н.А., Айнабекова А.А., Нарыжный С.В.* Влияние скорости резания на наличие и высоту нароста при сверлении быстрорежущими спиральными сверлами // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2013. № 29. С. 158–160.

17. Оптимальные подачи спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // Матер. VI межд. научно-практич. конф. «Техника и технология: новые перспективы развития». М.: Спутник +, 2012. С. 81–84.

18. *Рагрин Н.А.* Способы эксплуатации и восстановления работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // Машиностроитель. М., 2011. № 10. С. 35–37.

19. *Рагрин Н.А.* Исследование экстремума стойкостной зависимости при сверлении отверстий быстрорежущими спиральными сверлами / КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек: Текник, 2013. 90 с.

20. А.с. 1194582 СССР, МКИЗ В23В01/00. Способ определения оптимальной скорости резания, соответствующей максимальной стойкости режущего инструмента / В.Н. Подураев, А.Е. Древаль, Н.А. Рагрин // Б.И., 1985. № 44.

21. *Самсонов В.А., Рагрин Н.А., Стародубов И.И.* Особенности износа ленточек и уголков быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2012. № 27. С. 160–163.

22. *Рагрин Н.А.* Влияние износа отдельных рабочих элементов на характер формирования отказа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2009. № 19. С. 19–24.

23. *Рагрин Н.А.* Классификация способов определения скоростей резания при максимумах стойкости и наработки спиральных сверл // *Технология машиностроения*. М., 2015. № 2. С. 11–14.

24. *Рагрин Н.А.* Повышение работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // *Машиностроитель*. М., 2011. № 7. С. 37–39.

25. *Рагрин Н.А.* Пути повышения наработки до функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл на основе анализа кривых износа их режущих элементов // *Известия КГТУ им. И. Раззакова*. Бишкек, 2012. № 26. С. 14–17.

26. *Самсонов В.А., Рагрин Н.А., Стародубов И.И.* Особенности износа ленточек и уголков быстрорежущих спиральных сверл // *Известия КГТУ им. И. Раззакова*. Бишкек, 2012. № 27. С. 160–163.

27. *Муслимов А.П., Рагрин Н.А., Стародубов И.И.* Расчет стойкости быстрорежущих спиральных сверл // *Известия КГТУ им. И. Раззакова*. Бишкек, 2013. № 30. С. 13–16.

28. *Рагрин Н.А.* Пути повышения работоспособности быстрорежущих спиральных сверл в условиях автоматизированного производства // *Известия КГТУ им. И. Раззакова*. Бишкек, 2011. № 22. С. 26–29.

29. *Рагрин Н.А., Самсонов В.А.* Особенности влияния подачи на стойкость и наработку спиральных сверл // *Техника машиностроения*. М., 2013. № 4(88). С. 18–19.

30. *Режимы резания металлов*. Справочник / под ред. Ю.В. Барановского. Изд. 3-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1972. 409 с.

31. *Рагрин Н.А.* Влияние условий обработки на физическую модель износостойкости инструмента при сверлении // *Технология машиностроения*. М., 2013. № 12. С. 15–24.

32. *Рагрин Н.А.* Математическая модель стойкостной зависимости при сверлении // *Технология машиностроения*. М., 2014. № 1. С. 49–54.

33. *Рагрин Н.А.* Разработка стойкостной модели спиральных сверл при случайном характере процессов изнашивания // *Известия КГТУ*. Бишкек, 2015. №. 1(34). С. 60–63.

34. *Рагрин Н.А., Стародубов И.И.* Разработка стойкостной модели спиральных сверл для объема выпуска изделий // Известия КГТУ. Бишкек, 2015. № 3(36). С. 129–131.

35. *Рагрин Н.А.* Разработка статистической стойкостной модели спиральных сверл при различных типах производства // Технология машиностроения. 2015. № 11. С. 156–159.

36. *Рагрин Н.А. Самсонов В.А. Стародубов И.И.* Разработка классификации отказов, причин, видов и критериев отказов быстрорежущих спиральных сверл // Машиностроитель. М., 2015. № 5. С. 25–27.

37. ГОСТ 2575–83 Инструменты режущие. Термины и определения общих понятий.

38. Общемашиностроительные нормативы по износу, стойкости и расходу спиральных сверл. М.: НИИМАШ, 1980. 40 с.

39. *Рагрин Н.А.* Критерий технологического износа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2010. № 21. С. 55–59.

40. *Рагрин Н.А.* Критерий оптимального износа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2010. № 21. С. 43–45.

41. *Рагрин Н.А.* Разработка критериальных зависимостей быстрорежущих спиральных сверл // Научная мысль. М., 2015. №1. С. 39–50.

42. *Рагрин Н.А.* Анализ способов определения скорости резания при максимальной стойкости спиральных сверл // Технология машиностроения. М., 2014. № 7. С. 20–24.

43. *Рагрин Н.А.* Способы эксплуатации и восстановления работоспособности быстрорежущих спиральных сверл // Машиностроитель. М., 2011. № 10. С. 35–37.

44. *Рагрин Н.А.* Критерий функционального отказа быстрорежущих спиральных сверл // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2012. № 26. С. 18–20.

45. *Рагрин Н.А.* Способы определения точек максимума и перегиба стойкостной зависимости // Известия КГТУ им. И. Раззакова. Бишкек, 2013. № 29. С. 206–209.

46. *Рагрин Н.А.* Обеспечение максимальной стойкости и срока службы спиральных сверл // Научное обозрение. М., 2015. № 6. С. 61–73.

47. *Рагрин Н.А.* Математическая модель критерия отказа спиральных сверл // Вестник КРСУ. 2016. Т.16. № 1. С. 51–53.

48. *Пустыльник Е.И.* Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М.: Машиностроение, 1968. 288 с.

49. *Рагрин Н.А. Самсонов В.А.* Разработка статистических зависимостей и нормативных таблиц износа ленточек спиральных сверл // Известия КГТУ. 2015. №. 3(36). С. 132–136.

50. *Закс Л.* Статистическое оценивание. М.: Статистика, 1976. 598 с.

51. *Рагрин Н.А. Самсонов В.А. Айнабекова А.А.* Определение закономерностей влияния погрешностей заточки спиральных сверл на их стойкость // Технология машиностроения. М., 2015. № 7. С. 27–31.



## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
<b>Глава 1</b> Анализ проблемы. Разработка задач исследований .....	4
1.1 Анализ существующих экспериментальных способов определения скоростей резания, на которых стойкость сверл максимальная.....	4
1.2 Анализ существующих стойкостных моделей.....	6
1.3 Анализ критериев отказа и признаков потери работоспособности спиральных сверл .....	8
<b>Глава 2</b> Методы исследований .....	11
<b>Глава 3</b> Способы определения скоростей резания, на которых стойкость и наработка сверл максимальные. Решение первой задачи исследований .....	13
3.1 Числовые значения скоростей резания максимумов стойкости и наработки .....	13
3.2 Способы определения скоростей резания максимальной стойкости на основе закономерностей влияния скорости резания на физические характеристики процесса сверления.....	16
3.2.1 Закономерности влияния скорости резания на силы и моменты резания при сверлении сверлами с наличием износа.....	16
3.2.2 Закономерности влияния скорости резания на процессы наростообразования при сверлении спиральными сверлами .....	19
3.2.3 Закономерности влияния скорости резания на физические характеристики процессов изнашивания спиральных сверл.....	20
3.3 Классификация способов определения скоростей резания, на которых стойкость и наработка спиральных сверл максимальная.....	27
<b>Глава 4</b> Разработка стойкой модели. Решение второй задачи исследований.....	30
4.1 Выбор скоростей резания максимальной стойкости для различных типов производства .....	30
4.2 Выбор подачи.....	32
4.3. Стойкостная модель для типа производства .....	37

<b>Глава 5</b> Критерии отказа. Критериальные зависимости и критериальная модель. Решение третьей задачи исследований .....	42
5.1 Классификация отказов, причины, виды и критерии отказов спиральных сверл .....	42
5.2 Критерии отказа .....	46
5.3 Критериальные зависимости .....	48
5.3.1 Критериальные зависимости для расчета критерия функционального отказа .....	48
5.3.2 Критериальные зависимости для расчета критерия технологического отказа .....	53
5.3.3 Критериальные зависимости для типа производства .....	56
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	68

**Н.А. Рагрин**

**РАЗРАБОТКА И НАУЧНОЕ ОБОСНОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ  
БЕЗОТКАЗНОСТИ БЫСТРОРЕЖУЩИХ  
СПИРАЛЬНЫХ СВЕРЛ**

Редактор *И.С. Волоскова*  
Компьютерная верстка *А.С. Шелестовой*

Подписано в печать 29.03.2017  
Формат 60×84  $\frac{1}{16}$ . Печать офсетная.  
Объем 4,75 п. л. Тираж 100 экз. Заказ 33

Издательство КРСУ  
720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44

Отпечатано в типографии КРСУ  
720048, г. Бишкек, ул. Горького, 2